

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK

Csillagász szak

DIPLOMAMUNKA

Bazaltos kisbolygók statisztikai vizsgálata

Készítette: **Somoskői Tamás**, V. éves csillagász szakos hallgató
Témavezető: **Dr. Szabó M. Gyula**, egyetemi adjunktus,
SZTE TTIK, Kísérleti Fizikai Tanszék;
tudományos munkatárs,
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet

Szeged, 2011

Tartalomjegyzék

A dolgozat felépítése	3.
I. Bevezetés	4.
1. Kisbolygók a Naprendszerben	4.
1.1 Aszteroidák méreteloszlása, az ütközések hatása	4.
1.2 A kisbolygó főöv, a rezonanciák szerepe.....	4.
1.3 Kisbolygók a főövön kívül.....	6.
1.4 A Jarkovszkij folyamat.....	6.
1.5 A kisbolygócsaládok	7.
1.6 Kisbolygók felszíni jellemzői.....	8.
1.7 A meteoritok és kisbolygók kapcsolata.....	9.
1.8 A kisbolygók taxonómiai osztályozása.....	10.
2. A Vesta kisbolygó	12.
2.1 Fizikai paraméterek	12.
2.2 A Vesta és a Ceres összehasonlítása	12.
2.3 A Vesta kialakulása	13.
2.4 Spektrális jellemzők	15.
3. A Vesta család.....	15.
3.1 Keletkezési elméletek.....	15.
3.2 A családtagok méreteloszlása és pályái	16.
3.3 Nyitott kérdések	16.
4. Bazaltos égitestek a Vesta családon kívül.....	17.
4.1 A belső kisbolygóöv.....	17.
4.2 HED meteoritok	18.
4.3 A középső kisbolygóöv	19.
4.4 A Magnya és a külső öv	19.
II. Módszerek	20.
1. A Sloan digitális égboltfelmérés	20.
2. Hierarchikus klaszterezés	22.
3. Statisztikai próbák	24.
3.1 Kolmogorov-Szmirnov teszt	24.
3.2 Székely-Rizzo teszt	25.
4. Az R program	26.
III. Eredmények	27.
1. A statisztikai minta	27.
2. Hierarchikus felosztás	31.
IV. Diskusszió	35.
V. Összefoglalás	38.
Köszönetnyilvánítás	39.
Nyilatkozat	40.
Irodalomjegyzék	41.

A dolgozat felépítése

A dolgozatom első részében átfogó képet kívánok nyújtani a kisbolygókról. Majd részletesebben foglalkozom a vizsgálatom tárgyát képező Vesta családbeli aszteroidákkal, kiemelve a jelenlegi elmélet hiányosságait és az új eredményeket a témában. A második szakaszban ismertetem a felhasznált adatbázist, az alkalmazott statisztikai eljárást és az ennek megvalósítására szolgáló programcsomagot. A harmadik részben bemutatom az elvégzett vizsgálataimat, és végül összefoglalom a kapott eredményeket.

Kulcsszavak: kisbolygók, Vesta, statisztika, klaszterezés, statisztikai próbák

I. Bevezetés

1. Kisbolygók a Naprendszerben

1.1 Aszteroidák méreteloszlása, az ütközések hatása

Aszteroidáknak, vagy magyarul kisbolygóknak nevezzük azon kisméretű, szilárd anyagú égitesteket, melyek a Nap körüli pályán keringenek. Csak 3 olyan kisbolygót ismerünk, amelynek az átmérője meghaladja az 500 km-t, a számuk a méret csökkenésével hatványozottan nő, egészen a porszem méretű testekig. Földközeli kisbolygóból már 5-10 m átmérőjűeket is meg tudunk figyelni (McFadden et al. 2007), itt már csak az a kérdés, hogy mekkora méret fölött tekinthetjük még ezeket a hagyományos értelemben vett égitestnek. A földközeli kisbolygók 4 km-es átmérő fölött már ismertek, a fővben ez az érték 20 km (McFadden et al. 2007). Az 1 km-nél nagyobb testek számát 1 és 2 millió közöttire becsülik. A 300 km alatti testek valószínűleg mind ütközések töredékei. Optikai és radarmegfigyelések szerint a legnagyobb aszteroidák kivételével alakjuk teljesen irreguláris, mivel a saját gravitációjuk nem elegendő a gömbszimmetrikus forma kialakítására. Például az egyik irányban 200 km-es (216) Kleopatra kisbolygó, erre merőlegesen csak negyedekkora kiterjedésű.

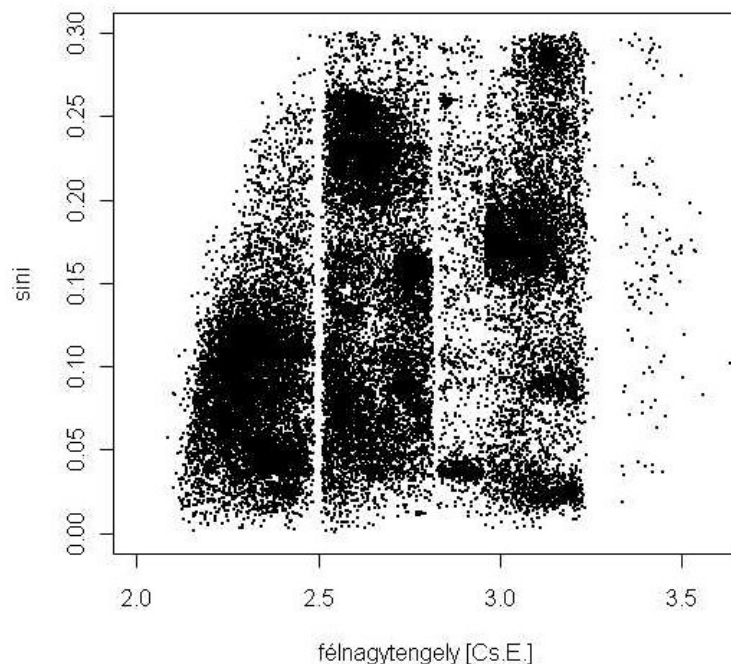
Nem minden ütközés jár viszont a testek további darabolódásával, ha a becsapódás energiája kicsi, a töredékek gravitációs ereje folytán újra összeállhat a kisbolygó. Ezt a szerkezetet hívják törmelékkupacnak ('rubble pile'). Ilyen módon két kisbolygó anyagot cserélhet, vagy össze is tapadhat (Davis et al. 1982). Ennek egy következménye az alacsony sűrűség és a testeken belüli üregek jelenléte. Utóbbi akár a test térfogatának 50%-át is elérheti (McFadden et al. 2007). Ilyen összetapadásra bizonyíték a (253) Mathilde kisbolygó felszínén felfedezett számos kiterjedt kráter, amelyek az égitest széttörését kellett volna eredményeznie (Flynn et al. 2010). Egy másik jel, ami erre utal, hogy a kisbolygók forgási sebessége kisebb egy adott küszöbértéknél, mivel e fölött a centrifugális erő szétrepítené a laza szerkezetű testeket (Harris 2008).

1.2 A kisbolygó főv, a rezonanciák szerepe

A kisbolygók viszonylag egyenletesen töltik ki a teret 1.8 és 4 csillagászati egységre a Naptól, ez az úgynevezett főv. Viszont adott félnagy tengelyű pályák szinte teljesen üresek, ezek az ún. Kirkwood-rések, amiket a középmozgás rezonancia hoz létre (1. ábra). Ha egy kisbolygó keringési ideje úgy aránylik a Jupiter keringési idejéhez, mint kis egész számok

hányadosa, akkor a Jupiter gravitációs vonzása mindig a pálya egy adott pontján a legerősebb. Ez a perturbáció elnyújtja az apró égitest pályáját. Amikor az excentricitása eléri a 0.35-ös értéket, a kisbolygó pályája metszeni fogja a Marsét. A Marssal való kölcsönhatás eredményeképp, pedig a többi kőzetbolygóval is ütközési pályára kerülhet. Ezután vagy becsapódás következik be, vagy további gravitációs perturbáció hatására az aszteroida elhagyja a Naprendszer (Érdi 2003). Végeredményben a rezonanciahelyek rövid időn belül – néhány millió év alatt – kiürülnek. Egy másik hasonló jelenség is befolyásolja a kisbolygók eloszlását, a szekuláris rezonancia. A Nap körül keringő kis- és nagy bolygók perihéliumpontja eltolódik, a pályák elfordulnak. Ha egy kisbolygó középmozgása és a Jupiter vagy a Szaturnusz középmozgása úgy aránylik egymáshoz, mint kis egész számok hányadosa, akkor az égitestek rezonanciába kerülnek. Ennek hatása hasonló a középmozgás rezonanciához, de függ a kisbolygók inklinációjától is. Így csak bizonyos félnagy tengelyű és pályahajlású keringési pályák ürülnek ki. Ez a jelenség magyarázza a kisbolygóöv belső határának függését az inklinációtól (Érdi 2003) (1. ábra). A szekuláris rezonanciákat $vn-el$ szokás jelölni, ahol a gravitációs perturbációt a Naptól számított n . bolygó okozza. A Naprendszerben a $v5$ ill. $v6$ rezonanciák a meghatározóak.

1. ábra . A kisbolygó főöv a rezonanciákkal



Az öv külső határát a Jupiter szabja meg, gravitációja megakadályozta a közelében más bolygók létrejöttét. Ugyanakkor perturbációja sok anyagot a külső Naprendszerbe lökött, ez magyarázhatja az Oorth felhő jelenlétét. Az energiamegmaradás elve miatt ekkor a Jupiter a

belső Naprendszer felé mozgott, a rezonanciahelyei is elmozdultak. Ez a folyamat lehet a felelős a külső kisbolygóöv anyagvesztéséért (Weidenschilling 1975).

1.3 Kisbolygók a főövön kívül

A főövön kívül is találhatunk kisbolygókat a Naprendszerben. A Jupiter L4 és L5 Lagrange pontjai körül találhatóak a Trójai kisbolygók. Jelenlegi körülbelül 2000 ismert tagjuk van, ennek kétharmada az L4 pontban. Egy másik jelentős csoport a Kentauroké. Ide sorolják mindazon aszteroidákat, amelyek a Szaturnuszon túl keringenek, és pályájuk metszi valamelyik óriásbolygóét. Jelenleg körülbelül 150 ilyen égitestet katalogizáltak. Több tagjuknál megfigyeltek kómaszerű kitörést, ez alapján a kisbolygók és az üstökösök közötti átmeneti égitestnek gondolhatjuk őket (Hartmann et al. 1987).

A kisbolygóövtől befelé haladva, a belső aszteroidákat 3 csoportra szokás osztani. Az Amor csoport pályája metszi a Marsét, de a Földet nem éri el. Azon testeket, melyek metszik a Föld pályáját, de a félnagy tengelyük nagyobb, mint 1 csillagászati egység, Apollóknak nevezzük. A harmadik csoportba a földpályát metsző, és a Naphoz egy csillagászati egységnél közelebb eső kisbolygókat soroljuk, a nevük Aten (Shoemaker et al. 1979). Utóbbi kettőt összefoglaló néven földközeli égitesteknek is hívják (Near-Earth Object). Viszonylag kis méretűek, legnagyobb tagjuk a (1036) Ganymed, mely 38,5 km átmérőjű. Mintegy 3800 ilyen kisbolygót fedeztek fel ezidáig, de ezek közül kevesebb, mint 1000 éri el az 1 km-es átmérőt. Számítógépes szimulációk szerint átlagosan 10 millió évig maradnak ilyen pályán, ennek oka a Nappal és a kőzetbolygókkal való ütközés, vagy a Naprendszer elhagyása (McFadden et al. 2007). Viszont különböző mechanizmusok révén a főövből érkező újabb aszteroidák folyamatosan feltöltik ezt a régiót.

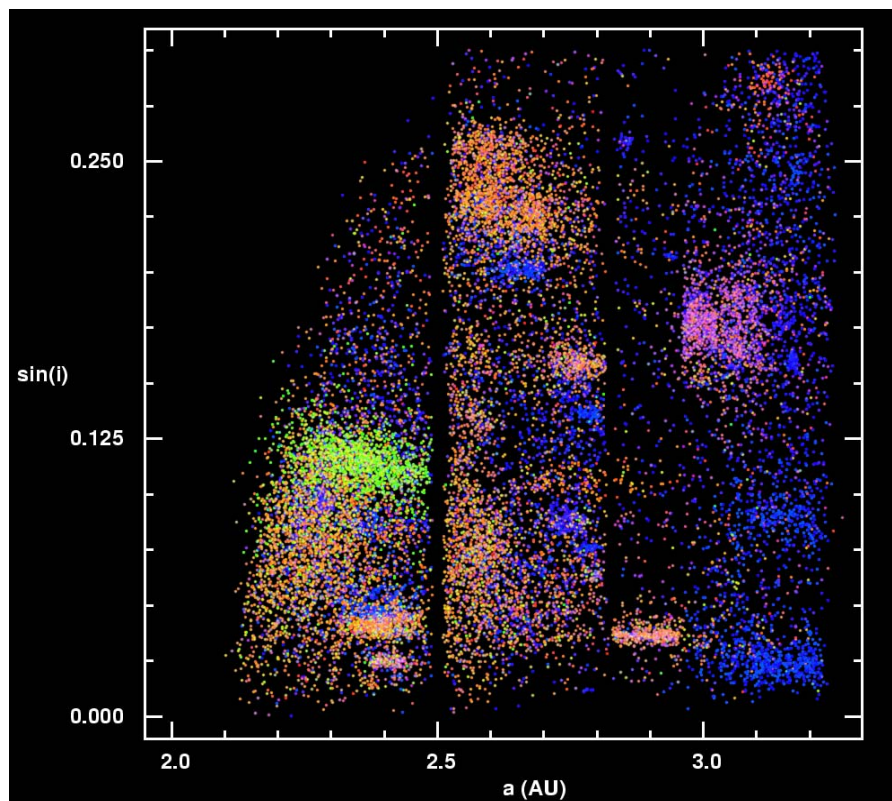
1.4 A Jarkovszkij folyamat

A rezonanciákon (és egyéb gravitációs perturbáción) túl is létezik egy kevésbé hatékony, de nem elhanyagolható effektus, amely képes megváltoztatni az apró égitestek pályáját. Ez az Jarkovszkij által a 19. században megjósolt jelenség a hőtehetetlenségen alapul. A napfényt elnyelő égitestek impulzust kapnak, majd infravörös sugárzás kibocsátásával impulzust veszítenek. A kettő között eltelt idő alatt viszont a kisbolygók elfordulnak, ezért a nettó impulzus-változás nem zéró. Ennek a következménye, hogy azon testek, amelyek keringési és forgási iránya megegyezik energiát kapnak, tehát a pályájuk félnagy tengelye megnő. Ezzel szemben a retrográd forgású égitestek a Naphoz egyre közelebb kerülnek (Hartmann et al. 1997). Erre egy közvetett bizonyíték, a retrográd forgású kisbolygók relatív gyakorisága a

földközeli aszteroidák között (Szabó 2005). A folyamat hatékonysága fordítva arányos az égitest méretével, nagyságrendileg $10^{-4}/D$ csillagászati egység millió évenként, ahol D az átmérő (Roig et al. 2006). Továbbá bonyolult számításokkal belátható, hogy a jelenség változtatja a testek forgási sebességét, illetve irányát (Rubincam et al. 2000). Ezt nevezik YORP effektusnak (Yarkovsky, O'Keefe, Radzievskii és Paddack nevéből).

1.5 A kisbolygócsaládok

A fővbeli kisbolygók mintegy 35 - 50%-a családokat alkot (Parker et al. 2008). Ezek a pályaelemek terében lévő csoportosulások, ezért is nevezik néha őket dinamikai családoknak. Az egy családon belüli égitestek közös eredetűek: egy közös szülő égitest fragmentálódásával jöttek létre (a szülő kisbolygó néhány esetben túléli az ütközést pl. (20) Massalia), ezért kémiai összetételük is hasonló (2. ábra).



2. ábra. A főv kisbolygócsaládjai, a kémiai összetétel szerint színezve (<http://www.astro.washington.edu/users/ivezic/sdssmoc/switch.html>)

Általában a családon belül az összetételbeli különbségek jóval kisebbek, mint két kisbolygócsalád között. Kivételt képeznek a kémiailag differenciálódott égitestek, melyek magjából és köpenyéből származó aszteroidák eltérő összetételűek. Jelenleg mintegy 50 domináns családot ismerünk (Parker et al. 2008). Ezeket leghatékonyabban különböző

statisztikai eljárásokkal határozhatjuk meg. A két legelterjedtebb módszer a hierarchikus klaszterezés (Hierarchical Clustering Method, Zappalà et al. 1990.), mely a pályaelemek terében az egymáshoz legközelebbi szomszédokat határozza meg, illetve a wavelet analízis (Bendjoya et al. 1991), ami a legnagyobb sűrűségű helyeket adja meg. Ezen a módon a családok határait nem lehet egyértelműen kijelölni, a külső égitestek folyamatosan beleolvadnak a háttérbe. Továbbá egy családon belül előfordulnak „betolakodó” (interlooper) kisbolygók – ezek általában az eltérő spektrumuk alapján ismerhetők fel. Családon belüli arányukat 10% körülire becsülik (Parker et al. 2008). Fontos megjegyezni hogy a kisbolygócsaládok nem állandó képződmények és néhány milliárd év alatt – különböző perturbációk és ütközések hatására – szétszóródnak (McFadden et al. 2007). Ily módon a Naprendszer korai időszakából származó családok azonosítására nincs lehetőség.

A kisbolygók méreteloszlása az egyik legfontosabb megfigyelhető jellemző, segítségével következtethetünk a család kialakulására és fejlődésére. Az idősebb családok kevés kis aszteroidát tartalmaznak, mivel ezeket a Jarkovszkij-effektus hamarabb szétszórja, a méreteloszlásuk egy „törött” hatványfüggvény, szemben a fiatalokra jellemző sima hatványfüggvénnyel (Parker et al. 2008). Ugyanakkor ez az eloszlás az egyik legnehezebben meghatározható mennyiség, az észleléseket terhelő erős kiválasztási effektusok miatt (Ivezić et al. 2001). Meg kell jegyezni, hogy az ütközések gyakorisága is befolyásolja a családok méreteloszlását, a kor mellett.

1.6 Kisbolygók felszíni jellemzői

Az aszteroidák felszíne légkör híján teljesen ki van téve a különböző kozmikus hatásoknak. Úgy mint különböző méretű meteorok becsapódása, kozmikus sugarak, elektromágneses sugárzás és töltött részecskék árama a Napból. Ezek hatását háromfelé lehet osztani: a nagyobb testek becsapódása krátereket hoz létre, vagy tovább darabolja a kisbolygót. A mikrometeorok és ionok becsapódása helyileg felhevíti a felszínt, és vékony réteget képez például nanofázisú vas formájában. A harmadik jelenség a felszín kémiai és spektrális változása, mikrometeorok, a napszél és sugárzás együttes hatására (Lazzarin et al. 2006). Az utóbbi két jelenséget összefoglaló néven záporozásnak (space weathering) nevezzük. A hatásukra az aszteroidák fizikai és optikai tulajdonságai megváltoznak. Az albedó összességében csökken, valamint a színek vörösebbé válik, azaz hosszabb hullámhosszakon a fényvisszaverő képesség megnő (Lazzarin et al. 2006). Másrészt a spektrumbeli sávok mélysége csökken, a gyengébbek teljesen el is tűnhetnek. Ez megnehezíti

a pontos taxonómiai besorolást. A hatás kumulatív, idősebb felszínű égitesteken erősebb, valamint függ a kisbolygó átlagos naptávolságától is.

1.7 A meteoritok és kisbolygók kapcsolata

A kisbolygók összetételéről két úton szerezhetünk ismereteket. Egyrészt az égitestek közvetlen megfigyelésével – spektroszkópiai vagy többszín-fotometriai mérésekkel, másrészt a Földön fellelhető meteoritok tanulmányozásával. Ezeket három főbb csoportra szokás osztani: kőzet, vasmeteorit, valamint ezen kettő keveréke. Az első típusúakat primitív kondritok vagy akondritok alkotják. A legalább részben fémes csoportok pedig bizonyos fokú kémiai differenciálódás következményei. A vasmeteoritok feltehetően egy megolvadt égitest magjából származnak, a fémes-sziklás jellegűek pedig a mag és a köpeny határfelületéről (Lazzaro 2009). Az oxigén izotópok relatív gyakorisága alapján 60-70 eltérő értéket mutatnak (Wasson 1995.). Tehát feltehetően ennyi differenciálódott égitest létezett a Naprendszerben, szemben a ma ismert egyetlen ilyen kisbolygóval, a Vestával. Ugyanakkor nem ismerünk olivinos meteoritokat, amelyek egy ilyen aszteroida köpenyéből származnának (Lazzaro 2009).

A meteoritok alapján szerezhető ismereteinket több tényező korlátozza. Először is azon dinamikai folyamatok, amelyek az aszteroidák töredékeit a Földre juttatják már *a priori* szelektálják a mintát. Nevezetesen a meteoroidok illetve szülőégitestjeik többsége a Jupiterrel vett 3:1 középmozgás és a Szaturnusszal való szekuláris rezonanciából ered, ami csak egy keskeny szeletét adja a főövnek. Emellett a Föld légköre is hatékony szűrőként működik. A levegőben nagy sebességgel (11 – 70 km/s) érkező test felhevül és anyagának nagy része elpárolog, mielőtt elérné a felszínt. Egy szilárdabb vasmeteoritnak nagyobb esélye van a túlélésre, mint egy lazább szerkezetű és/vagy illékonyabb anyagokat tartalmazó testnek (McFadden et al. 2007). Valamint az évente nagyságrendileg 500 becsapódó meteorból átlagosan 5-öt találnak meg. Ezen kiválasztási effektusok következtében az ismert meteoritok nem tekinthetők reprezentatívnak a kisbolygóöv anyagi összetétele szempontjából (Wasson 1995).

A másik jelentős problémát az jelenti, hogy a meteoroidok kialakulása, a Földig tartó útja és becsapódása során számos hatásnak vannak kitéve, amely megváltoztathatja a fizikai és kémiai tulajdonságait. A szülő égitestből való kicsapódás extrém körülmények között történik, a Világűrben töltött idő alatt ki vannak téve a záporozás hatásának és a Föld légkörében a keletkező hő is jelentősen átformálja a meteorokat. Végül nem felejtkezhetünk el

az estleges földi szennyezések hatásairól sem (Greenwood et al. 2009). Az egyes meteorittípusokat kisbolygó taxonómiai csoportokkal szokás párosítani, bár ez a fentebb vázolt okoknál fogva nem teljesen megbízható.

1.8 A kisbolygók taxonómiai osztályozása

A másik út a többszín-fotometria vagy spektroszkópiai megfigyelés. Utóbbi sokkal több mindent árul el az égitestről, ám előbbi mód jóval egyszerűbb és gyorsabb (lásd a II.1. fejezetet). A kisbolygókat a színekük alapján szokás taxonómiai csoportokba sorolni. Jelenleg többféle osztályozás létezik, melyek 10-25 osztályt különböztetnek meg (Bus et al. 2002). A legismertebbek a David J. Tholen által bevezetett, illetve az SMASS (Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey) mérésein alapuló klasszifikáció. Ennek ellenére az egyes főbb spektráltípusok elnevezése megegyezik a különböző osztályozási rendszerekben és többnyire ugyanazt értik alatta. Különbség az alkalmazott válogatási módszerben és a szokatlan spektrumú égitestek besorolásában van. Dolgozatomban az SMASS-féle osztályozást vettem alapul, amely szélesebb körben használt.

Az egyes taxonómiai csoportok a kisbolygóöv egy adott részére jellemzőek (2. ábra). A külső övön kívül, a Jupiter Trójai kisbolygói között a P és a D osztály tagjai dominálnak, gyakoriságuk 4 illetve 5.2 csillagászati egységnyi a legnagyobb. Alacsony albedójú, primitív égitestek. Spektrumuk szilikátokat, szénvegyületeket, illékony anyagokat és vizet mutat, valamint összetett szerves molekulákra utaló nyomokat is megfigyelhetünk. Ez utóbbiak gyakorisága a Naptól számított távolsággal nő (Hiroi et al. 2004). Anyagi összetételük alapján a belső kisbolygók és az üstökösök közötti átmeneti égitesteknek tekinthetőek.

2.6 és 3.1 Cs.E. között fordulnak elő legnagyobb számban a kondritos C típus képviselői, valamint olyan kisebb csoportok, mint a B, F és G. Főként olivint, piroxént, szenet, hidrált szilikátokat, kisebb mennyiségben pedig szerves vegyületeket tartalmaznak. Anyaguk enyhe hevítés és hidrációs folyamatok nyomait mutatja. Az ismert kisbolygók mintegy 75%-a a C típusba tartozik. A valódi számarányuk viszont ennél is nagyobb lehet. Egyrészt felszínük igen sötét, albedójuk 0.03 és 0.1 közé esik. Valamint átlagos naptávolságuk nagyobb, mint a többi kisbolygótípusé, az eloszlás maximuma 3.2 csillagászati egységnyi van. Ezen két ok miatt halványabb célpontok, mint más típusok. Spektroszkópiai jellemzőik: erős UV elnyelés 400 nm alatt, e fölött sima színekép, 3 μm -nél víz abszorpciós vonal (Schmidt et al. 2010).

Három csillagászati egységen belül egyre több módosult kisbolygót találunk, ennek oka a korai Naprendszerben végbement hevítési folyamat. A V típusú égitestek felszínét bazaltos

kőzet alkotja, mely főleg piroxén és plagioklász nevű ásványokat tartalmaz.(lásd az I. 2. fejezet) Ez arra utal, hogy egy megolvadt majd eltérő sűrűségű héjakba rendeződő kisbolygó felszíni darabjai. Spektrális jellemzőik az 1 és 2 μm -nél lévő piroxénvonalak. A színeképük jó egyezést mutat a HED nevű bazaltos akondrit meteoritokkal.

Egy ilyen valamikori égitest magjából származhatnak az M típusú kisbolygók. Erre utal a vas és nikkeltartalom, valamint a közepesen magas albedó (0.1-0.2), ami fém jelenlétét sejteti. Valószínűleg ezektől származnak a fémes meteoritok. Spektrumuk általában sima, karakteres sávok nem jellemzőek (Harris 1979).

Az elég ritka A típusú kisbolygók pedig feltehetően egy differenciálódott kisbolygó köpenyét alkothatták. Színeképükre jellemző az 1 μm -es széles olivin sáv (Bus et al. 2002).

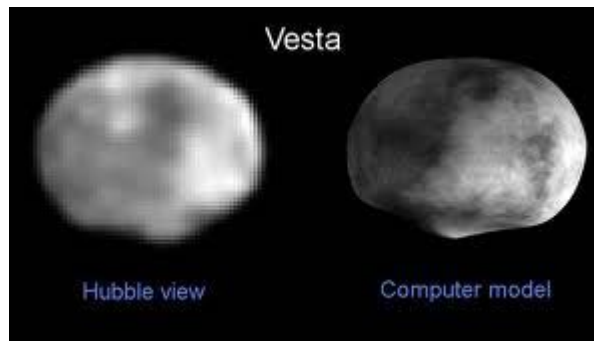
A legheterogénebb csoportot a Naphoz közeli S típusú szilikátos kisbolygók jelentik. Eltérő mennyiségben tartalmaznak olivint, piroxént illetve vas-nikkelt ötvözeteket. Az S típus 7 alosztályát különböztetjük meg a relatív olivin/piroxén tartalom alapján. Ennek oka, hogy a szilikátos kisbolygók igen eltérő termális történettel bírnak: különböző mértékű olvadás, differenciálódás, és hő alapú metamorfózis hatását viselik magukon (Szabó 2005). A kisbolygók 17%-a az S típusba tartozik, a leggyakoribbak a Naptól 2.8 Cs.E.-re. Albedójuk tipikusan 0.1 és 0.2 közti érték. Spektrumuk 700 nm-nél rövidebb hullámhosszakon sima, jelentősebb abszorpciós sávokat 1 és 2 mikron körül mutatnak. A naphoz való közelségük miatt a záporozás erősen alakítja a felszínüket (Bus et al. 2002).

Látható hogy az egyes taxonómiai típusok eltérő naptávolságoknál koncentrálnak, ez megfeleltethető a kisbolygóöv különböző kémiai összetételű régióinak. A magasabb hőmérsékletű szilikátok a belsőbb övben dominálnak, míg a hidegebb széntartalmú ásványok gyakoribbak a Naprendszer külső részén. Ivezic és munkatársai 2001-es cikkükben kimutatták, hogy ez a trend adott taxonómiai típusokon belül is érvényesül, például a Naphoz közelebbi S típusúak vörösebbek, mint a típusátlag. Ez valószínűleg a Szoláris Ködben meglévő kémiai elemgyakoróság gradienst tükrözi (McFadden et al. 2007).

2. A Vesta kisbolygó

2.1 Fizikai paraméterek

A (4) Vesta a második legnagyobb égitest a kisbolygóövben a maga 529 km-es átmérőjével és $2.67 \cdot 10^{20}$ kg tömegével (Thomas et al. 1997). A Hubble űrteleszkóp megfigyelése szerint alakja szferoidális, eltekintve a déli pólusnál található 460 km átmérőjű óriás krátertől (3. ábra). Ez okozza, a 60 km-es eltérést a Vesta legkisebb és legnagyobb átmérője között (Ruzicka et al. 1997). A kisbolygó átlagos albedója, vagy fényvisszaverő képessége átlagosan 0.42, de a felszínen sötétebb foltok is megfigyelhetők. A Vesta átlagos sűrűsége 3.42 g/cm^3 (Baer et al. 2008) és feltehetően nem porózus szerkezetű, a kisbolygók többségével ellentétben. Ennek oka a tömegéből adódóan nagy belső nyomás.



3. ábra A (4) Vesta kisbolygó nyers képe és számítógéppel javított változata (<http://www.psr.d.hawaii.edu/Sept07/cosmicSpherules.html>)

2.2 A Vesta és a Ceres összehasonlítása

A Vestát az teszi egyedivé, hogy ez az egyetlen ismert geokémiaileg differenciálódott kisbolygó. Azaz különböző termális és kémiai folyamatok elkülönítették a könnyű és nehéz ásványait. Ennek következtében a belső szerkezete a kőzetbolygókhoz hasonlóan eltérő sűrűségű héjakból áll. Egy ilyen szerkezet csak magas hőmérsékleten alakulhat ki, amikor a kőzetek részben vagy teljesen megolvadva a saját sűrűségüknek megfelelő héjba rendeződnek (Lazzaro 2009). Jelenlegi ismereteink szerint ez csak nagy tömegű égitesteknél valósulhat meg, mivel a kevésbé masszív kisbolygók hamar leadják a hőt (Ruzicka et al. 1997). Ezen kívül a kémiai összetétel, az akkréció helye és ideje is fontos szerepet játszik. Így például a legnagyobb ismert kisbolygó, a (1) Ceres, bár a főövben közel helyezkedik el a Vestához (2.77 ill. 2.34 Cs.E. a pálya félnagy tengelye), mégsem mutat differenciálódásra utaló jeleket. Felszínét hidrált szilikátok borítják, a víz jelenléte pedig összeegyeztethetetlen egy magas hőmérsékletet igénylő folyamattal (Lazzaro 2009).

2.3 A Vesta kialakulása

A differenciálódást kiváltó hő valószínűleg a radioaktív ^{26}Al és ^{60}Fe izotópok bomlásával keletkezett (Moskovitz et al. 2008). Modellszámítások szerint $1.25 \cdot 10^{-5} \text{ }^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ arány már elegendő a kőzetek megolvasztásához (1500 °K) (Federico et al. 2008). A születőben levő Nap körüli anyagkorongon belül a radioaktív izotópok gyakorisága határozta meg, hogy mely égitestekben indult meg a kémiai differenciáció. Ezen izotópok felezési ideje $t_{1/2}(^{26}\text{Al})=7,2 \cdot 10^5$ év, illetve $t_{1/2}(^{60}\text{Fe})=2,6 \cdot 10^6$ év. Mennyiségük néhány millió év alatt jelentősen csökkent a radioaktív bomlás következtében, ennek alapján a Vesta kialakulását 4.5 milliárd évvel ezelőttre tehetjük (Yamakawa et al. 2010). Az ennél később összeállt kisbolygók már nem tartalmaztak elegendő mennyiségű izotópot ahhoz, hogy megolvadjanak. A ma ismert mintegy 700 vasmeteorit feltehetően egykori differenciálódott kisbolygók magjából származik. Az izotópok arányai alapján ezek körülbelül 70 ilyen égitest valamikori létezésére utalnak (Wasson 1995). A geológiai differenciálódás folyamatára két elmélet létezik:

1) Részleges olvadási eredet: a kisbolygó belsejében a lokálisan több radioaktív izotópot tartalmazó cellák elmozdulása és sűrűség szerinti rendeződése hozta létre a ma ismert szerkezetet. Ezen elmélet szerint először a köpeny és a héj vált ketté és csak ezt követően különült el a kisbolygó magja (Gupta et al. 2009).

2) Leülepedő olvadék eredet : ez az elképzelés egy 1700 K hőmérsékletű magma óceánt jósol. A hőmérséklet csökkenésével az eltérő olvadáspontú komponensek fokozatosan válnak ki ún. egyensúlyi kristályosodás során.. Ez azt jelenti, hogy a kikristályosodó ásvány kémiai egyensúlyban van a kőzetolvadékkal, homogén összetételű kristályokat alkotva. Az elmélet először a fémek mag különválását jósolja, ezt követi a konvektív köpeny fokozatos kikristályosodása. Majd a fennmaradó folyékony kőzet a felszínre kerül, bazaltot alkotva. A bazaltkéreg alsó rétege a nyomás hatására átalakul, diogenizálódik (Gupta et al. 2009).

Mindkét folyamat egy héjas szerkezetű, belülről kifelé csökkenő sűrűségű égitestet eredményez. Az egyes rétegek a következők Ruzicka és munkatársai nyomán (4. ábra):

- I. Mag: vasat, nikkelt és ként tartalmaz. Az össztömeg legfeljebb 25%-át teszi ki, a legvalószínűbb érték 5%. A mag sugara kevesebb, mint 130 km.

II. Köpeny: olivinben gazdag, 65 – 220 km vastag héj. Az olivin SiO_2 -ben telítetlen magmás kőzetalkotó ásvány, bázisos és ultrabázisos kémhatású kőzetek lényeges elegyrésze. Üvegfényű, színe zölde, ritkán barnás. Két fajtája a forszterit ($\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$) és a fayalit ($\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$) (Pápay 1998).

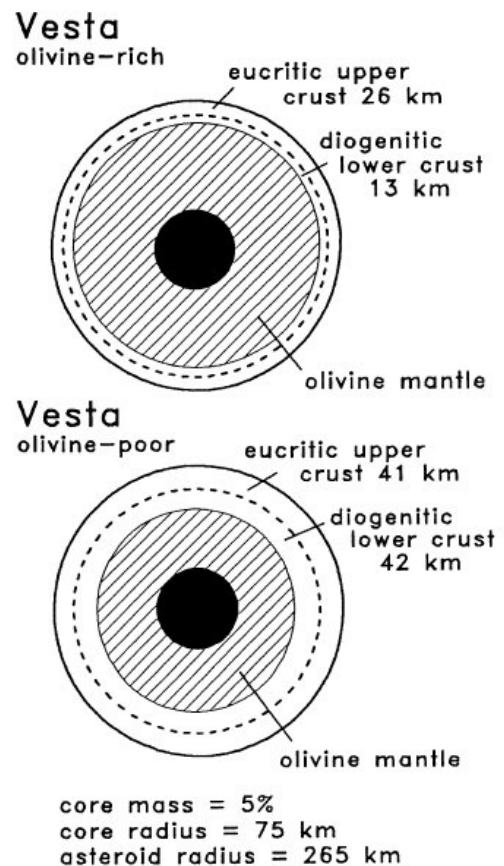
III. Kéreg: bazalt alkotja, ez a Földön a leggyakoribb kiömlési kőzet. Bázikus jellegű, fő kőzetalkotói a plagioklász-földpátok, a piroxének valamint az olivin. A plagioklász az albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) és az anorit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) vegyületek izomorf elegyéből áll. A Földön a mélységi és kiömlési magmás kőzetek lényeges elegyrészei. A piroxének elsődleges kiválású sötét kőzetalkotó ásványok. Vízgőzben szegény, bázikus, magas hőmérsékletű magmából keletkeznek. Két rendszerben

kristályosodnak: monoklin (klinopiroxén) és rombos (ortopiroxén).

Általános képletük: ABC_2O_6 , ahol A, B és C különböző kationokat jelölnek: Li, Na, Mg, Al, Ca, Sc, Cr, Mn, Fe, Zn (Pápay 1998).

A kérget két részre lehet bontani, az alsó vulkáni törmelékes kőzeteket tartalmaz, vastagsága 12 – 43 km. A felső kéreg vastagsága 23 és 42 km közé tehető.

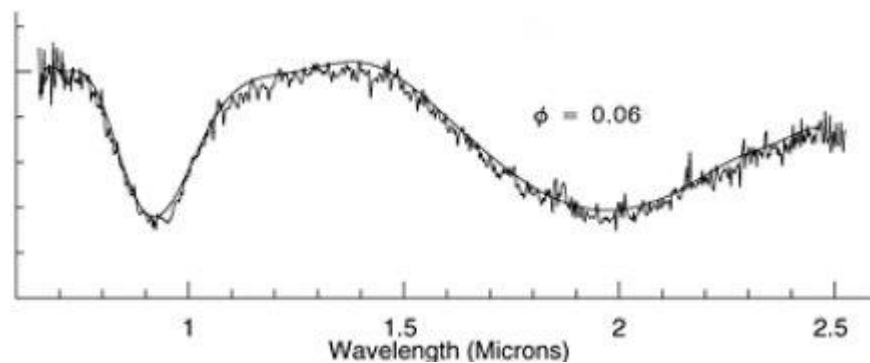
A fenti adatok egy olivinben gazdagabb ill. szegényebb Vestának felelnek meg, ahogy ez a 4. ábrán is látható. Az teszi lényegessé a különbséget, hogy a Vesta déli pólusán található becsapódási kráter az egyik esetben csak az alsó kéregig ér le, a másikban viszont a mélyebb olivines köpenyt is érinti. A (2579) Spartacus kisbolygó – mely valószínűleg a Vesta töredéke – spektruma jelentős olivintartalomra utal (Burbine et al. 2001), ez az utóbbi modellt erősíti.



4. ábra A Vesta belső szerkezete a két modell alapján (Ruzicka et al. 1997)

2.4 Spektrális jellemzők

A Vesta bazaltos felszíne karakteres színeképet mutat. 400-tól 750 nm-ig fokozatosan növekszik a fényvisszaverő képesség. Két mély abszorpciós sáv jellemzi a 900-1000 nm illetve az 1900-2000 nm közötti tartományt (5. ábra). Ez a piroxének jelenlétének tulajdonítható. A fentebb vázolt spektrumot mutató kisbolygókat V típusúnak nevezik a jelenlegi taxonómiák (Tholen 1984, Bus et al. 2002).



5. ábra A Vesta kisbolygó színeképe a két jellegzetes piroxénsávval (Martel 2007)

3. A Vesta család

3.1 Keletkezési elméletek

1989-ben Williams és munkatársai felfedeztek a belső kisbolygóövben néhány, a Vestához közeli pályán keringő apró égitestet. 1993-ban Binzel és Xu megfigyelései alapján kiderült, hogy ezen kisbolygók spektruma nagyon hasonlít a Vestáéhoz. Több elmélet született ennek megmagyarázására, például hogy ezek egy a Vestába csapódott aszteroida maradványai, amelyeket a Vesta pora fedett be (Wasson 1996), vagy ezek valójában S típusú kisbolygók (Bell 1998). A jelenlegi nézet szerint ezek a Vesta becsapódási krátereiből származó töredékek, és ez magyarázza a spektrális hasonlóságot. Ezen kisbolygókra a továbbiakban vestoidokként hivatkozok.

A fent említett kráter keletkezési idejére vonatkozóan megoszlanak a vélemények, az irodalomban fellelhető két szélső érték 1 és 3.5 milliárd évvel ezelőtti kort jelöl meg (Nesvorný et al. 2008). A korai keletkezésnek a Late Heavy Bombardment (Kései Bombázás) hatása, a késeinek pedig a család pályáinak eltávolodása adhat korlátot. A Late Heavy Bombardment jelentése az a 3.5 - 4.1 milliárd évvel ezelőtti időszak, amikor a Jupiter belső irányú vándorlása során a 2:1 rezonanciahely végigvonult a kisbolygóövön. Ennek eredménye rengeteg pályamódosulás, ütközés és a Naprendszerből való kilökődés volt, ebből a korból származik a legtöbb Holdkráter is. Számítások szerint a becsapódás a Vesta egyenlítője és a

déli szélesség 60° között következett be és az ütközés illetve a tömeg-átrendeződés kibillentette a forgástengelyt az eredeti helyéről, így került a kráter a déli pólusra (Schmidt 2010). Az ütközés során felszabadult törmelék túlnyomó része visszahullt a felszínre, néhány töredék (a kráter térfogatának 3-6%-a) viszont önálló kisbolygóként kezdett keringeni a Nap körül. Így jött létre a Vesta család.

3.2 A családtagok méreteloszlása és pályái

A család méreteloszlása elég sajátos: a Vesta átmérője mintegy 529 km, a többi tag viszont a 10 km-es méretet sem éri el. Ez egy tipikus példája az ütközéses eredetnek. A család elemszámát 5000 és 10000 közé teszik, a válogatási kritériumtól függően (Nesvorný et al. 2008). A leggyakrabban előforduló adat 9500 tag, ez a Vestától számított 60 m/s-os levágásnak felel meg (Roig et al. 2006). [A sebesség dimenzió arra utal, hogy ekkora sebességet kell kapnia egy testnek, hogy a kívánt távolságba kerüljön a szülő égitestétől a fázistérben.] A család kiterjedését Zappalá határozta meg 1994-ben egy hierarchikus klaszterezés nevű statisztikai eljárással (részletesen lásd II.2. rész). Eszerint a Vesta család tagjainak a pályaelemei a következő intervallumba esnek: $2.26 < a < 2.48$ Cs.E., $0.075 < e < 0.122$, $5.6^\circ < i < 7.9^\circ$. Belülről a Jupiterrel való 7:2, kívülről pedig a 3:1 középmozgás rezonancia határolja.

3.3 Nyitott kérdések

Az anyagi összetételt vizsgálva néhány beszédes kérdőjelre akadunk. A vestoidok spektruma gyakran vörösebb, mint a Vestáé, vagyis a hosszabb hullámhosszakon magasabb albedóval bír (Lazzaro 2009). Ilyen hatást többek között a space weathering-nek tulajdonítanak, de épp ellentétes előjellel. Tehát az űr-időjárás hatásának hosszabb ideje kitett testek (itt a Vesta) mutatnak vörösödést a fiatalabbakkal szemben. Bazaltos meteoritokon végzett mérések megmutatták, hogy kisebb szemcseméretű mintákkal is elérhető a vörösebb spektrum (Burbine 2001). Noha arra egyelőre nincs elfogadott magyarázat, hogy mi okozná a kőzetek eltérő szemcseméretét a szülőégitesten és annak töredékein.

Ezen kívül a Vesta régióban a kisbolygók 1 μm -es piroxénsávja mélyebb, mint a többi vestoidé vagy magáé a Vestáé (Burbine 2001).

Vilas és munkatársai 11 vestoid spektrumának vizsgálatakor azt találták, hogy csupán 6 mutat 505.6 nm-en abszorpciós vonalat. Ez a jellemző kalciumban gazdag piroxénekre utal

(ún. augit), ami megfigyelhető a Vesta spektrumában is. Egy lehetséges magyarázat erre az eltérésre, az hogy a vizsgált kisbolygók a Vesta különböző rétegeiből származnak.

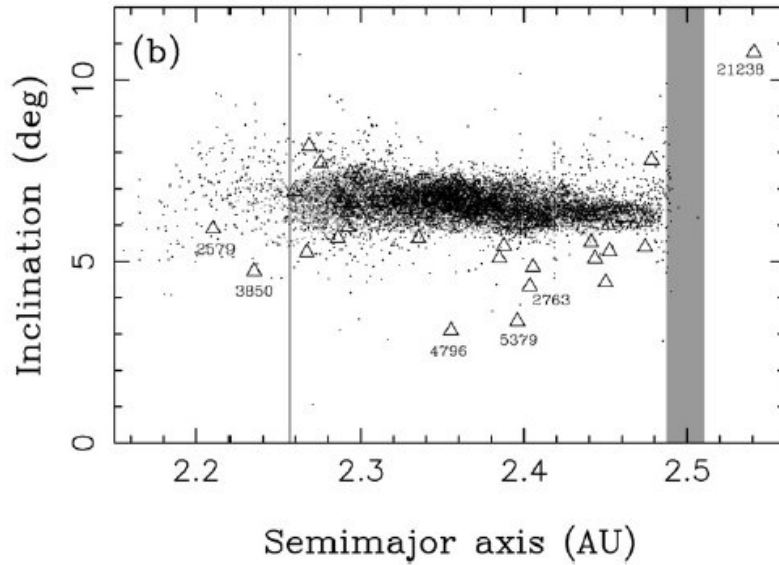
Ezen adatok azt sugallják, hogy a család jóval heterogénebb, mint korábban hittük. Lehetséges, hogy a vestoid kisbolygók különböző becsapódási eseményből erednek. A fent említett 460 km átmérőjű kráter mellett a Vesta felszínén található egy 150 és egy 160 km átmérőjű kráter is. Az eltérő kor megmagyarázná a szűken vett családból kilógó pályájú égitesteket és a záporozás révén az eltérő spektrumot, mely idővel eltűntetheti a gyengébb sávokat. Fentebb láttuk, hogy a család kora nagyon bizonytalan (1 – 3.5 milliárd év). Néhány szerző az eltérő pályaelemek és spektrális jellemzők miatt azt is felvetette, hogy egyes V típusú kisbolygók nem a Vestáról származnak (Duffard 2004, Nesvorný 2007, Lazzaro 2009).

4. Bazaltos égitestek a Vesta családon kívül

A fentebb vázolt keletkezési elmélet szerint a V típusú kisbolygók mind a Vesta töredékei, melyeket egy, a déli krátert okozó becsapódás hozott létre. Az elmúlt évtized eredményei nagyban árnyalják a képet, esetenként megkérdőjelezzik ezt a forgatókönyvet. Több megfigyelés szerint a fenti névleges határon kívül is vannak V típusú kisbolygók, amelyek a szinképük alapján megkülönböztethetetlenek a névleges családtagoktól (Burbine 2001, Duffard 2004). Mai tudásunk szerint a V típusú aszteroidák előfordulnak a földesúroló kisbolygótól egész a külső kisbolygóövig. Nézzük ezeket részletesen:

4.1 A belső kisbolygóöv

Jelenleg 22 olyan belső övbeli V típusú kisbolygót ismerünk, melyek nem tagjai a Vesta családnak. David Nesvorný és munkatársai számítógépes szimulációk alkalmazásával arra a következtetésre jutottak, hogy a Jarkovszkij effektus és a bolygók gravitációs perturbációja révén az eredeti Vesta család tagjainak 16%-a 2 milliárd év alatt a fenti névleges határokon túlra fejlődik. Viszont ez a szimuláció sem magyarázza meg az alacsony inklinációjú ($<6^\circ$) V típusú kisbolygók jelenlétét a belső övben (6. ábra) (Roig & Gil-Hutton 2006, Moskovitz et al 2008.).



6. ábra. A szimulációk során kapott vestoidok (pontok) és az ismert családon kívüli V típusú aszteroidák (háromszögek) (Nesvorný et al.)

Egy további probléma, néhány V típusú kisbolygónak a Vestától indulva több mint 1 km/s kezdősebességre lenne szüksége a jelenlegi pályájának eléréséhez. Modellszámítások szerint viszont a becsapódás után kirepülő töredékek sebessége legfeljebb 650 m/s (Asphaug 1996).

4.2 HED meteoritok

Tradicionalisan a spektrális hasonlóság okán a V típushoz szokás kötni az ún. HED meteoritokat. A betűszó a howardit, eukrit és diogenit meteoritokat takarja. A diogenit magnéziumban gazdag, kalciumban szegény ortopiroxénekből álló mélységi magmás kőzet. Az eukrit vasban gazdag piroxént és nátriumban szegény plagioklászt tartalmazó bazaltos kőzet. Létezik felszíni és üledékes eredetű fajtája is. Howarditnak nevezzük az eukrit és diogenit töredékekből álló breccsákat (a breccsa durvatörmelékes kőzet, melyben a 2 mm-nél nagyobb szemcsék dominálnak, vulkáni kőzetek összetöredezésével és összecementálódásával keletkeznek) (Pápay 1998). Összesen mintegy 400 HED meteoritot ismerünk, ezek fele eukrit, egynegyede pedig diogenit ill. howardit. A tömegarányt tekintve a HED tömegének csak 15%-át adják a diogenitek és hasonló arányt képviselnek a howardit meteoritok (Burbine et al. 2001).

A kialakulásukra a legelfogadottabb elmélet szerint a Vestából származó néhány kisbolygó a Jupiter 3:1 középmozgás és a ν_6 szekuláris rezonancia hatása alá került. Ezek megnövelték a kisbolygók excentricitását, amik így földsúroló pályára kerültek. Maguk a meteoroidok ütközések hatására szakadtak ki ezen kisbolygókból, majd csapódtak a Földbe (Duffard et al.

2004). Geokronológiai/radiometriai mérések alapján a HED meteoritok kora 4.4-4.6 milliárd év közé tehető (Ghosh 2010). Az oxigén izotóp gyakoriság szerint közös eredetűek. Ez alól kivétel a NWA 011 nevű meteorit. Emellett némileg eltérő értéket mutat további 5 HED: Pasamonte, NWA 1240, Ibitira, Asuka 881394 és PCA 91007 (Greenwood et al. 2009). Ezeket lehet magyarázni más szülő égitesttel, vagy egy heterogénebb összetételű Vestával.

A V típusúhoz hasonlóan a HED spektrumára is jellemzőek a 0.9-1 μm és 1.9-2 μm -es piroxén sávok, de szélességük és a minimum helye némileg eltér – ez magyarázható az eltérő szemcsemérettel és a különböző hőmérséklettel. Valamennyi ilyen meteoriton megfigyelhető a fentebb említett 506.5 nm-es vonal is (Vilas et al. 2000).

4.3 A középső kisbolygó öv

Jelenleg két spektroszkópiailag is megerősített V-típusú kisbolygót ismerünk a középső övben (2.5 – 2.8 Cs.E.): (21238) 1995 WV7 és (40521) 1999 RL95 (Lazzaro 2009). Az ilyen pályák kialakulásának fő akadálya, hogy a vestoidoknak át kell jutniuk a Jupiterrel való 3:1 középmozgás rezonancián. Ez rendkívül instabil és az áthaladó égitesteket kaotikus pályára kényszeríti. Roig és mtsai. szerint egy kisbolygó Jarkovszkij folyamattal való átjutásának

$$\text{valószínűsége: } f_{\text{cross}} \approx 0.075 \cdot \frac{1\text{km}}{D} \cdot \cos \varepsilon$$

Ahol D az égitest átmérője, pedig a forgástengely ferdesége. Az átjutási valószínűség kis méretű kisbolygókra nagyobb, mivel a Jarkovszkij folyamat esetükben hatékonyabb. Ez a fenti kisbolygók esetén 0.15% és 0.25%. Látható tehát hogy a Vesta családból származhatnak középső övbéli kisbolygók, de csak kis méretűek és ezek átjutásának esélye a rezonancián is igen csekély: 0.1-0.8% (Roig 2008).

4.4 A Magnya és a külső öv

A V típusú kisbolygók eredetével kapcsolatban számos kérdést vetett fel egy külső övbéli kisbolygó, az (1459) Magnya bazaltos felszínének felfedezése 1998-ban (Lazzaro et al. 2000). Ugyanis nehéz volna magyarázni, hogy a Vestáról származik. Ahhoz hogy a Vesta pályájáról a jelenlegi, 3.15 Cs.E. félnagy tengelyű pályájára kerüljön, legalább 5 km/s-os kezdősebességre volna szüksége, szemben a becsapódásoknál jóval legfeljebb 650 m/s-os sebességgel (Asphaug 1997). Jelenleg nem ismert olyan dinamikai folyamat, ami magyarázná az eljutását a külső övbe. Továbbá a Magnya a maga 17 km átmérőjével nem illik bele a Vesta családba, ahol csak 10 km-nél kisebb égitesteket találunk (Nesvorný et al.

2008). Harmadrészt, a Magnya a Vestától eltérő piroxén/földpát arányú bazaltot tartalmaz, és az albedója is némileg különböző (0.37 ill. 0.42) (Hardersen et al. 2004). Jelenleg a Magnya-n túl két V típusú kisbolygót ismerünk a külső kisbolygóövben: (7472) Kumakiri és (10537) 1991 RY16. Utóbbi kettő spektruma 650 nm-en olyan gyenge sávot mutat, amit még nem észleltek V típusú égitest esetén. (Duffard et al. 2009).

Mivel jelenlegi tudásunk szerint a differenciálódás csak nagy méretű testek esetén megy végbe, a másik lehetőség hogy a Magnya és társai egy ilyen külső övbeli égitest töredéke lehet. Ez esetben viszont a szülő égitest, illetve annak többi darabja hiányzik. Ugyanakkor érdemes figyelembe venni, hogy ez a régió számos rezonanciát magába foglal. Szimulációk kimutatták, hogy egy hipotetikus Magnya család néhány milliárd év alatt teljesen szétszóródik, a távolságuk nagyobb lesz, mint 150 m/s a klaszterezés szempontjából. A Magnya régió taxonómiai feltérképezésére kísérlet történt (Michtchenko et al. 2002), de újabb V típusú égitestet nem találtak, csupán a vártnál több S és M típusú kisbolygót, amelyek egy valamikori differenciálódott test köpenyéből ill. magjából származhatnak. A külső kisbolygóöv vizsgálatát megnehezíti, hogy a távoli kisbolygók igen halványak, ezért csak a legnagyobb méretűeket ismerjük (Lazzaro 2009).

II. Módszerek

1. A Sloan digitális égboltfelmérés

A Sloan digitális égboltfelmérés (Sloan Digital Sky Survey, a továbbiakban SDSS) egy elsősorban extragalaktikus megfigyelőprogram, amely a teljes égbolt mintegy negyedének több sávbeli feltérképezését tűzte ki célul. Mintegy 930 000 galaxist és több mint 120 000 kvazárt észlelt. A felmérés az Északi Galaktikus Pólus környékén 10 000 négyzetfokos területet fed le, míg egy kisebb, de mélyebb észlelést is végez a Déli Pólus környékén 225 négyzetfok égbolterületen. Az asztrometriai mérések pontossága 0.1 ívmásodperc. A project főműszere az Új-Mexikó állambeli Apache Point Observatory 2.5 m-es tükrű távcsöve (<http://www.sdss.org/>). A több sávbeli mérések a módosított Gunn szűrőrendszeren alapulnak, amely öt elemet tartalmaz: u, g, r, i és z (Ivezić et al. 2001, Roig et al. 2006).

	u	g	r	i	z
Központi hullámhossz (nm)	354	477	623	763	913
Félértékszélesség (nm)	57	138	138	153	135
Határfényesség (magnitúdó)	22.0	22.2	22.2	21.3	20.5

Egy adott égterület fényképezése során a két szélső szűrővel készült kép között közel 5 perc telik el, ami alatt a közeli Naprendszerbeli égitestek mérhető módon elmozdulnak. Noha az SDSS alapvetően extragalaktikus program, ez lehetőséget teremt kisbolygók megfigyelésére. Az ily módon azonosított apró égitestek egy szabadon hozzáférhető adatbázisba kerülnek, az ún. Mozgó Objektumok Katalógusába (MOC). A MOC a fényességértékek és az észlelési körülmények mellett a már ismert aszteroidák pályaelemeit is tartalmazza. A katalógus jelenlegi, negyedik kiadása közel fél millió kisbolygó megfigyelést tartalmaz. Ez két nagyságrenddel múlja felül az előtte ismert aszteroidák számát. A határfényesség tekintetében pedig 5 magnitúdós előrelépést jelent. Továbbá a több szűrővel végzett mérések lehetővé teszik a megfigyelt égitestek összetételének meghatározását (Ivezić et al. 2001). Összehasonlításképpen a hasonló célra használt kisbolygó spektrumok közül eddig csupán 2300-al rendelkezünk (elsősorban az SMASS felmérésnek köszönhetően). Érdekes még megemlíteni a korábbi taxonómiai besorolás alapjául szolgáló ECAS (Eight Color Asteroid Survey) felmérést, 589 db megfigyeléssel. Az előnyök mellett azonban szót kell ejteni a hiányosságokról is. Az SDSS negyedik kiadása tartalmaz nem megfelelő fotometriai körülmények között végzett mérési eredményeket is. Emellett a Tejútrendszer síkjához közeli megfigyelések fotometriai és asztrometriai pontossága is kisebb a névlegesnél. Ennek oka a számos pontforrás jelenléte, melyek megnehezítik az égitestek egyértelmű azonosítását (<http://www.astro.washington.edu/users/ivezic/sdssmoc/sdssmoc.html>).

Ivezić Željko és munkatársai 2001-es cikkükben definiálták az SDSS MOC kisbolygó színeinek első főkomponensét. Ez a különböző színek lineáris kombinációjaként előálló változó, amely mentén a minta szeparációja maximális. A definíció:

$$a^* = 0.89 \cdot (g - r) + 0.45 \cdot (r - i) - 0.57$$

Pozitív a^* értékkel rendelkeznek az S, V, D és A típusú kisbolygók. A negatív értékekhez pedig a C, M, P és E taxonómiai osztályok tartoznak.

A statisztikai adatsorokat jellemző két fontos mennyiség a tisztaság és a teljesség. Előbbi azt mondja meg, hogy a minta hányad részét adják a valóban ide tartozó adatok. Jelen esetben a katalógus mekkora hányada valódi aszteroida, nem pedig más égitest vagy műszeres

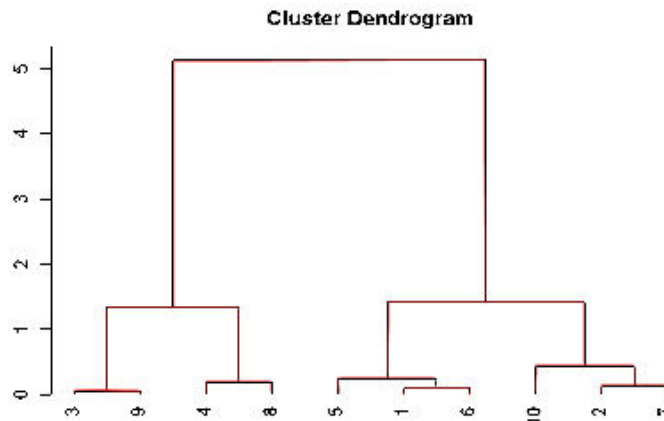
effektus eredménye (ún. műtermék). Az adatbázis teljessége az általunk keresett objektumok közül a mintába ténylegesen bekerültek és ezek teljes számának hányadosa (Szabó 2005). Juric és mtsai az SDSS MOC harmadik kiadásának tisztaságát 94%, teljességét pedig 95%-ra becsülték.

2. Hierarchikus klaszterezés

A statisztikai eljárások célja a nagy számú megfigyelés összegzése és tömörítése, valamint ezek alapján a valóság modellezése. Az első két cél a leíró statisztika feladata, utóbbival a következtető vagy matematikai statisztika foglalkozik. Bár ez a felosztás nem mindig egyértelmű. A statisztika nagy előnye, hogy olyan részleteket is ki tudnak mutatni, amelyek az egyedi mérések során az észlelési hibák miatt elvesznének. Továbbá képes az adatok jelentős tömörítésére, a bennük rejlő legfontosabb információk kiemelésére.

A statisztikai módszerek egyik csoportja a klaszterezés. Ez az eljárás képes feltárni egy adatsor belső szerkezetét. Eszköze az adatok csoportokba rendezése oly módon, hogy az azonos csoportba tartozó elemek bizonyos szempont szerint hasonlítsanak, míg más klaszterek elemeitől különbözzenek. Ezt a „hasonlóságot” matematikailag egy távolság értékkel írjuk le. Legyen n db adatpontunk, mindet p db mennyiséggel tudjuk jellemezni. Ezen mennyiségek közül kiválasztva a probléma szempontjából lényegeseket, azokat tetszés szerint súlyozva definiáljuk két adatpont távolságát. A kapott távolság párokat egy $n \times n$ -es mátrixba szokás rendezni, ahol az n_{ij} mátrixelem jelenti az i . és a j . adatpont távolságát. Ez az ún. távolságmátrix, amely nyilván szimmetrikus és a főátlóban 0-k állnak.

Az általam használt eljárás, a hierarchikus klaszterezés módszere halmazok összevonásán alapul. Ez azt jelenti, hogy a folyamat nulladik lépésében minden adatpont egy önálló klaszterbe tartozik és ismertek a közöttük lévő távolságok. Az eljárás során megkeressük a két legközelebbi halmazt és ezeket egyesítjük. Amint ez megtörtént, szükséges újra meghatározni az egyesített klaszter többitől vett távolságát. Ezt a két lépést addig ismételjük, amíg az összes adatpont egy közös halmazba nem kerül (Münnich et al. 2006). Az eljárás eredményét egy ún. dendrogramon, magyarul fa diagramon szokás ábrázolni (7. ábra). A függőleges vonalak a klasztereket jelképezik, kettő összekötése pedig a halmazegyesítést. A függőleges tengelyen látható a definiált távolság. Ebből leolvashatjuk hogy milyen távolságoknál lettek összevonva a halmazok, más szóval azok mennyire hasonlóak.



7. ábra. Példa egy dendrogramra

A hierarchikus klaszterezésnek is több válfaja létezik, attól függően hogyan definiálja két halmaz távolságát. Néhány eljárás:

- egyszerű lánc (a legközelebbi szomszéd elve): két klaszter távolsága megegyezik a két legközelebbi pontjuk távolságával.

- teljes lánc (a legtávolabbi szomszéd elve): eszerint két halmaz távolságát a két legtávolabbi pontjuk közötti távolsággal értelmezzük

- átlagos távolság: két klaszter távolsága az összes elemük páronkénti távolságának átlaga

- ward-féle távolság: első lépésben minden klaszteren belül kiszámoljuk az összes változó átlagát, majd meghatározzuk minden elem eltérését az átlagtól. Minden lépésnél azt a két halmazt vonjuk össze, amely a klaszteren belüli szórásnégyzetet a legkevésbé növeli (Münnich et al. 2006).

Az eljárás végén a fa diagram segítségével el kell döntenünk, hogy hány halmazra osztjuk a mintánkat, azaz mekkora távolságnál vágjuk el a hierarchikus fát. Erre nincs matematikai eljárás, sem pedig ökölszabály. Érdekes az egymástól a dendrogramon szereplő távolságokhoz képest viszonylag távoli halmazokat szétválasztani. Ugyanakkor a nagyon kevés elemű halmazokat nem érdemes megtartani. Az ilyen kiugró értékek valószínűleg mérési hiba eredményei vagy nagyon speciális objektumok (Münnich et al. 2006). A fenti 7. ábra esetén két halmaz definiálása a legkézenfekvőbb választás.

3. Statisztikai próbák

A statisztika fontos feladata a hipotézisvizsgálat. Ebben minták jellemzői közötti eltéréseket vizsgálunk. Ezek a jellemzők (pl. középérték, eloszlás) becslés eredményei, így hibával terheltek. Ezért feltehetjük azt a kérdést, hogy a minták közötti eltérések lényegesek, vagy csak véletlenszerű fluktuáció következményei?

Például legyen két mintánk, amelyek becsült középértéke és szórása eltér. Azt kérdezzük, hogy származhatnak-e ugyanabból az eloszlásból. Ehhez összehasonlítjuk a két adatsor paramétereinek közötti eltérést a becslésünk pontosságával. Ha a becslés hibája mellett az eltérés kicsi, akkor a különbség oka nagy valószínűséggel a statisztikai fluktuáció. Fordított esetben viszont a két minta között lényegi különbség van. Hogy mennyi a „nagy” eltérés, azt az határozza meg, hogy mekkora bizonyossággal akarjuk elvetni az azonos eloszlásról szóló feltevésünket (Szepesváry 2002).

A gyakorlatban rendelkezünk egy feltevéssel, amit a teszt segítségével szeretnénk igazolni illetve megcáfolni, ez az ún. nullhipotézis. Szükségünk van egy ezt kizáró ellenhipotézisre is. A statisztikai próba során kétféle hibát követhetünk el: elvetjük a nullhipotézist, pedig az helytálló (első fajú hiba); elfogadjuk a helytelen nullhipotézist (másodfajú hiba). Az első fajú hiba el nem követésének valószínűsége a próba szignifikanciája (α), a másodfajú hiba el nem követésének valószínűsége a próba ereje (β). Mindkét fajta hiba bizonyos valószínűséggel bekövetkezik, de lehetőségünk van egyik esélyét csökkenteni a másik rovására. Általában magas szignifikanciájú tesztek használunk ($\alpha \geq 90\%$) (Szabó 2009). A próba eredményeként egy p-értéket kapunk, amely az első fajú hiba elkövetésének valószínűségét jelenti – vagyis ekkora eséllyel tévedünk, ha elvetjük a nullhipotézist. Ha ez az érték kisebb $1-\alpha$ -nál (jellemzően 5%), akkor a nullhipotézist elvetjük és az ellenhipotézist fogadjuk el. Ellenkező esetben azt mondjuk, hogy a teszt nem cáfolta meg a nullhipotézisünket.

3.1 Kolmogorov-Szmirnov teszt

Ez a statisztikai próba azt vizsgálja hogy két minta azonos eloszlást követ-e. Illetve egy adatsor származhat-e egy adott eloszlásból. A nemparaméteres egydimenziós tesztek közé tartozik, azaz független az eloszlástól. A módszer a két minta kumulatív eloszlásfüggvényét hasonlítja össze. Ha ezek különbségének maximuma meghalad egy adott küszöbértéket, akkor a két eloszlást eltérőnek nyilvánítjuk. Képlete:

$$\frac{1}{\sqrt{n_e}} \cdot \max |F(x) - G(x)| > k$$

$F(x)$ és $G(x)$ a két normált kumulatív eloszlásfüggvény, n_e pedig az effektív elemszám ($n_e = n_1 n_2 / (n_1 + n_2)$). A k küszöbértéket a választott szignifikanciaszint határozza meg. Mivel a kumulatív függvény csak egy dimenzióban értelmezhető, ezért a teszt csak ilyen adatsorok esetén használható (Szabó 2009).

3.2 Székely-Rizzo teszt

A Székely-Rizzo teszt szintén a minták eloszlását hasonlítja össze. Viszont több dimenziós adatsorokat is képes vizsgálni és a minták száma sem korlátozódik kettőre. További jó tulajdonsága, hogy számításigénye független a dimenziószámtól és a minták darabszámától. A próba az alábbi egyenlőtlenségen alapul:

$$2 \cdot E\|X - Y\| - E\|X - X'\| - E\|Y - Y'\| \geq 0$$

Ahol X, X' ill. Y, Y' d dimenziós véletelen változók, amelyek páronként azonos eloszlásból származnak (az E operátor a várható értéket, $\|\cdot\|$ pedig a normát jelöli). Szavakban ez azt jelenti, hogy két különböző eloszlású mintából vett elem távolságának várható értéke nagyobb, vagy egyenlő mint az azonos eloszlású mintából származó két elem távolságának várható értéke. Egyenlőség csak akkor áll fenn, ha mindegyik változó azonos eloszlást követ. Legyenek $A = \{X_1, \dots, X_{n_1}\}$ és $B = \{Y_1, \dots, Y_{n_2}\}$ diszjunkt halmazok. Definiáljuk a két minta halmaz távolságát az alábbi módon:

$$e(A, B) = \frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2} \cdot \left(\frac{2}{n_1 \cdot n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \|a_i - b_j\| - \frac{1}{n_1^2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_1} \|a_i - a_j\| - \frac{1}{n_2^2} \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} \|b_i - b_j\| \right)$$

Ez a Székely Gábor által bevezetett ún. energia-távolság (röviden e -távolság). Megmutatható, hogy ha az $n_1 + n_2 = n$ közös elemszámot a végtelenbe tartatjuk, akkor az $e(A, B)$ távolság véges határértékhez tart, ha A és B eloszlása azonos, illetve a végtelenbe tart ha az eloszlások különbözőek. A gyakorlatban ha az $e(A, B)$ távolság meghalad egy (szignifikanciaszinttől függő) küszöbértéket, akkor elvetjük azt a hipotézist, hogy a két adatsor eloszlása azonos.

A teszt kivitelezéséhez egyesítsük a két mintát. Majd visszatevéssel kiválasztunk belőle n elemet, oly módon, hogy ez reprezentálja a két minta számarányát (vagyis n_1/n eséllyel választok az A részhalmazból és n_2/n eséllyel a B -ből). Ezt a bootstrap-nek nevezett eljárást megismételjük K -szor (K nagyságrendileg $10^3 - 10^4$). Ezen K db minta között is meghatározzuk az e -távolságokat. Végül össze kell hasonlítani a két különálló mintát jellemző

$e(A,B)$ távolságot, az egyesített mintát jellemző $e(k)$ távolságokkal. A nullhipotézisünk hogy A és B azonos eloszlást követ. Ha $e(A,B)$ meghaladja az $e(k)$ távolságokat az esetek $\alpha\%$ -ban (szignifikancia), akkor el kell vetnünk ezt a hipotézist (Székely 2004).

4. Az R program

Az R egy magas szintű programozási nyelv valamint egy statisztikai adatkezelő és ábrázoló környezet. Az S programozási nyelv egy megvalósítása, innen ered a másik elnevezése: GNU S. Emiatt a programban levő utasítások közül több hasonlít, esetleg teljesen megegyezik az S-ben használtakkal. Az R első változatát Ross Ihaka és Robert Gentleman alkotta meg 1997-ben az Auckland-i egyetemen, Új-Zélandon. Fejlesztését egy nemzetközi csoport azóta is végzi. A program elnevezése részben az alkotók keresztnevére utal, részben az S-hez hasonló sémát követ.

Jelenleg a világ vezető statisztikusai közül sokan az R-t, használják és a tudományos publikációkban is gyakran előfordul. Az alkalmazási köre igen kiterjedt, használják többek között a közgazdaságtanban, az élettudományban, a természettudományokban és a mérnöki gyakorlatban is (<http://www.r-project.org/>).

Az R a GNU GPL licenc-t használja, vagyis forráskódja nyílt, szabadon hozzáférhető. Sokféle UNIX alapú operációs rendszer alatt fut, de létezik Windows-os és Macintosh-on működő változata is. A standard R parancssoros interfészt használ, ennek a Linux-hoz hasonlóan megvan az a jó tulajdonsága, hogy a korábban kiadott parancsok visszahívhatók. Ennek a programnak is létezik számos grafikus változata, például a Java-t a használó JGR, vagy a Microsoft Excelen alapuló RExcel. Az R moduláris rendszerű, vagyis telepítéskor csak egy alapvető funkciókat tartalmazó egységet kapunk. Ez bővíthető különböző csomagok letöltésével. Egy csomag tartalmazhat speciális területeken használt függvényeket, új grafikus megjelenítő eszközöket vagy más adatformátumok használatához szükséges kiegészítőket. Ezen programcsomagok elérhetőek az Interneten keresztül, a CRAN oldaláról (Comprehensive R Archive Network; <http://cran.r-project.org/>)

Az R legjelentősebb képességei a következők:

- Nagyszámú statisztikai módszer végrehajtására képes, többek között: lineáris és nemlineáris modellezés, statisztikus tesztek, idősor analízis, osztályozás, klaszterezés, korreláció, közelítés, interpoláció, predikció, stb.

- Ezen bonyolult alkalmazások néhány egyszerű parancs segítségével könnyen és gyorsan végrehajthatóak
- Ezen kívül számos a statisztikában gyakran előforduló függvényt előre definiáltak, pl. többféle átlagolás, átskálázás, eloszlások, távolságok
- Lehetőség van saját függvények és scriptek írására
- Képes egyenleteket és a mátrix algebrát kezelni
- C, C++ és Fortran kódot is be lehet illeszteni
- Publikációs színvonalú ábrák készítésére is alkalmas többféle fájlformátumban

Meg kell jegyezni, hogy az R azon képessége miszerint könnyen és gyorsan csinálhatunk vele bonyolult statisztikákat nagyon vonzó lehet. Ugyanakkor ehhez a módszerek pontos hátterét is illik ismerni, hogy kiválaszthassuk a számunkra megfelelőt és az eredményeket helyesen tudjuk értelmezni. A statisztikai módszerek átgondolatlan használata ún. artifact-ek (műtermékek) létrejöttéhez vezethet, azaz olyan eredményekhez, amik nem a mintát jellemzik, hanem mesterségesen kerülnek bele.

III. Eredmények

1. A statisztikai minta

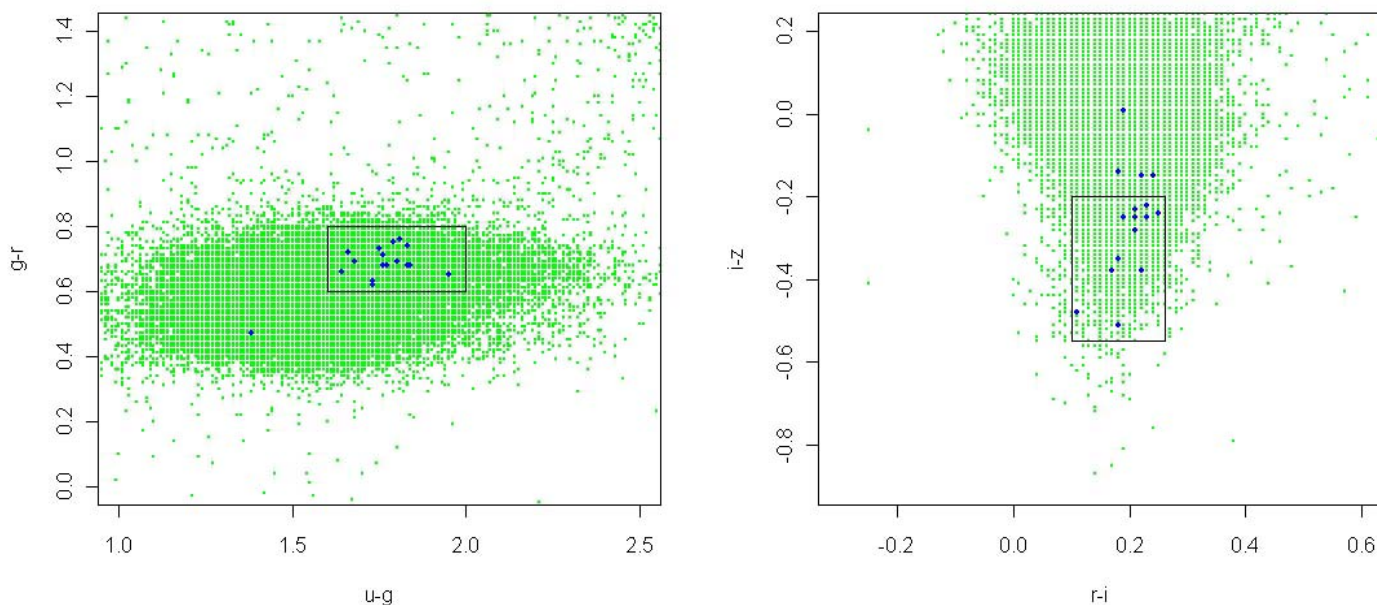
A megfelelő minőségű statisztikai minta előállításához elengedhetetlen a nyers adatok előzetes válogatása. Vizsgálataim célja egy karakteres színekkel rendelkező kisbolygó osztály. Ennek pontos azonosításához megbízható fotometriájú adatok kellenek. Ezért első lépésben az SDSS MOC katalógusban a g, r, i és z sávban a 0.1, míg az u sávban a 0.5 magnitúdónál nagyobb hibájú méréseket kizelektáltam. Az u sávban az átlagos fotometriai hiba jóval nagyobb, mint más sávokban és erősebb korlátozása jelentősen lecsökkentette volna az adatok mennyiségét. Ugyanakkor a V típusú kisbolygók azonosításában sem játszik kulcsszerepet, ezért engedhető meg a nagyobb hibakorlát (Ivezić et al. 2002).

Az SDSS kisbolygó katalógusának bemutatásakor jeleztem, hogy nem minden mérés pontossága kielégítő. Ezek konkrétan az Égi Egyenlítő +/- 1.26 fokra és negatív galaktikus szélességen végzett szupernóva kereső méréssorozatok. Az innen származó mérési adatok kiszűrése mellett döntöttem. Ehhez a katalógusban szereplő ekvatoriális koordinátákat átszámoltam galaktikus koordinátákká, az alábbi formula segítségével:

$$\sin b = \sin \delta \cdot \cos 62.6^\circ - \cos \delta \cdot \sin(\alpha - 282.25^\circ) \cdot \sin 62.5^\circ \quad (\text{Duffett-Smith, P.})$$

Ahol b jelöli a galaktikus szélességet, az α és a δ pedig a rektaszценziót illetve a deklinációt. Emellett a Tejútrendszer síkjában, -15° és $+15^\circ$ galaktikus szélesség közötti megfigyelések is elronthatják a mintát. A nagy csillagsűrűség meghiúsíthatja egy elmozduló égitest képről képre való követését és könnyen téves azonosításhoz vezet. Ezen adatokat is kiválogattam a végső adatsorból, melyben így 57 ezer megfigyelés maradt.

A következő lépés a számunkra érdekes, V-típusú aszteroidák azonosítása a fenti mintából. Ehhez az SMASS és az SMASS II (Bus&Binzel 2002) spektroszkópai felmérések során azonosított V típusú kisbolygókat használtam fel. Ezek közül 19 db szerepel az átválogatott mintában. Az 5 fotometriai sávból képzett 4 színindex (u-g, g-r, r-i és i-z) terében az ismert V



8. ábra Az ismert V típusú kisbolygók és a kiválasztási térfogat négy színben

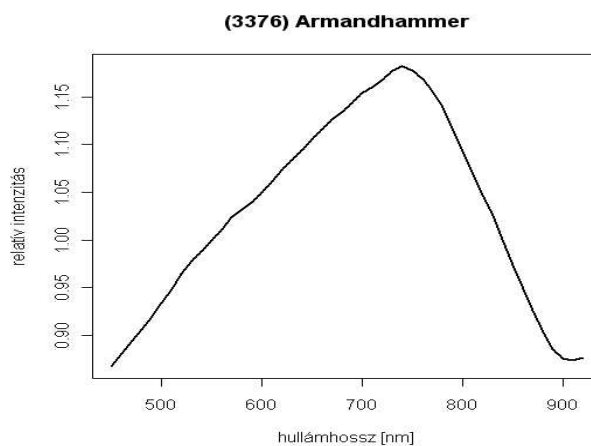
típusúak segítségével kijelöltem a kiválasztási térfogatot. Vagyis azt a 4 színbeli tartományt, amelybe valószínűleg a V típusú kisbolygók tartoznak (8. ábra).

színindex	u-g	g-r	r-i	i-z
Minimum	1.6	0.6	0.1	-0.55
Maximum	2.0	0.8	0.26	-0.2

A V típusú aszteroidák azonosításában az i-z sáv a legfontosabb, ez a kisbolygó spektrumában jelenlévő 0.9-1.0 μm közötti piroxénvonal mélységére utal (5. ábra). A

piroxének mennyisége alapján választjuk ketté a V és az S típust. Láthatóan az i-z sávban a kiválasztott tartományon túl is előfordulnak a V-típus képviselői. Azonban ezeket már nem lehet csak fotometriai módszerrel, a színük alapján megkülönböztetni a szilikátos S kisbolygóktól – ehhez infravörös spektrumokra volna szükség. A belső kisbolygóöbben az S típusú aszteroidák a leggyakoribbak. Ezért egy kissé tágabb kiválasztási térfogat mellett már nagyszámú S-típusú elem kerülne be a mintába.

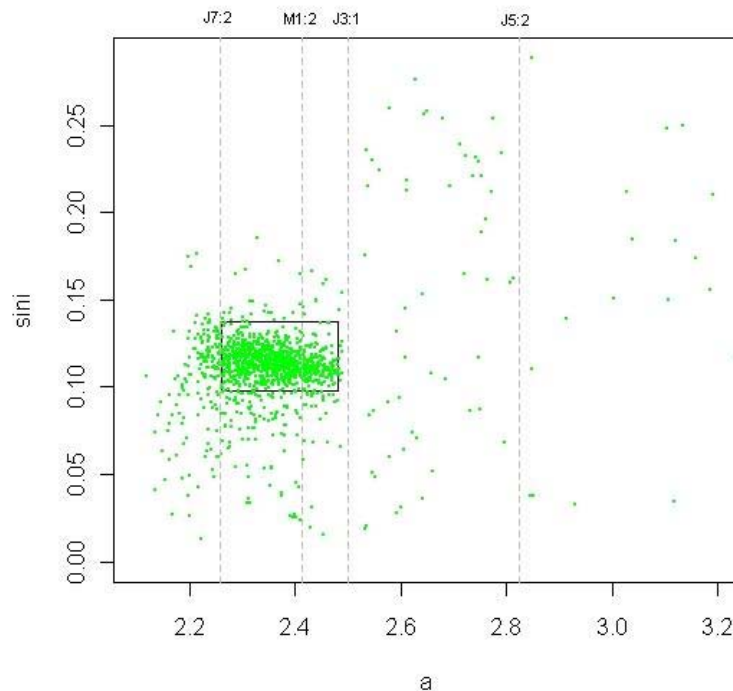
A fenti színindex tartományokat használva 1599 db, vélhetően V típusú kisbolygó került a statisztikai mintába. A továbbiakban vestoid-jelölt néven hivatkozom rájuk. Az eljárás hatékonyságának mérésére két paraméter szolgál. Ezek a tisztaság és teljesség. A statisztikai minta tisztaságát a következőképpen becsülhetjük: a kiválasztási térfogatban lévő ismert V típusú kisbolygók száma, osztva az összes a térfogatba eső ismert típusú kisbolygó számával. Jelen esetben az SMASS és SMASS II katalógus elemei közül csak 1 más típusú égitest került a mintába: (3376) Armandhammer kisbolygó. Ez a Bus & Binzel –féle osztályozás szerint az Sq típusba tartozik, de a spektruma a látható tartományban nagyon hasonlít a V-típushoz (9. ábra). Tehát a minta tisztasága: $11/12=0.92$, vagyis egy véletlen mintabeli elem ekkora valószínűséggel valóban V-típusú. A teljesség becsült értéke a mintába bekerült ismert V-típusú és az összes ismert V-típusú égitest számának hányadosa. Ez az érték $11/19 = 0.58$. Vagyis a módszerünk ennyire hatékony a V-típusú kisbolygók megtalálásában. Az előző két becslésnél hallgatólagosan feltételeztük, hogy a V és a nem V taxonómiai típusú aszteroidákat azonos valószínűséggel észleli az SDSS felmérés (Szabó 2005).



9. ábra. A (3376) Armandhammer, Sq típusú kisbolygó spektruma

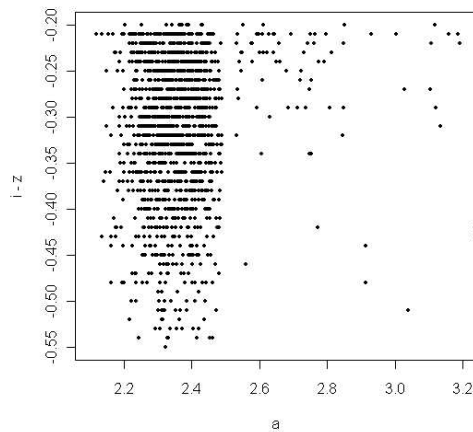
A statisztikai mintában szereplő kisbolygók pályaelemeit a 10. ábra mutatja. A Vesta család névleges határait – melyeket Zappalá és mtsai határoztak meg egy téglalap jelöli. Jól láthatóan a bazaltos kisbolygók a családon kívül is megtalálhatóak. Az ábrán feltüntettem a

Jupiter és a Mars középmozgás rezonanciáit, amelyek befolyásolják az ilyen pályán levő kisbolygókat. Ezek jellemzően kaotikus mozgásra kényszerülnek és néhány 10 ezer év alatt ütközési pályára kerülnek egy nagybolygóval vagy elhagyják a Naprendszeret (Nesvorný et al. 2008).



10. ábra A bazaltos jelölt kisbolygók pályaelemei. A Vesta család helye téglalappal jelölve. A Jupiter és a Mars középmozgás rezonanciái szaggatott vonallal.

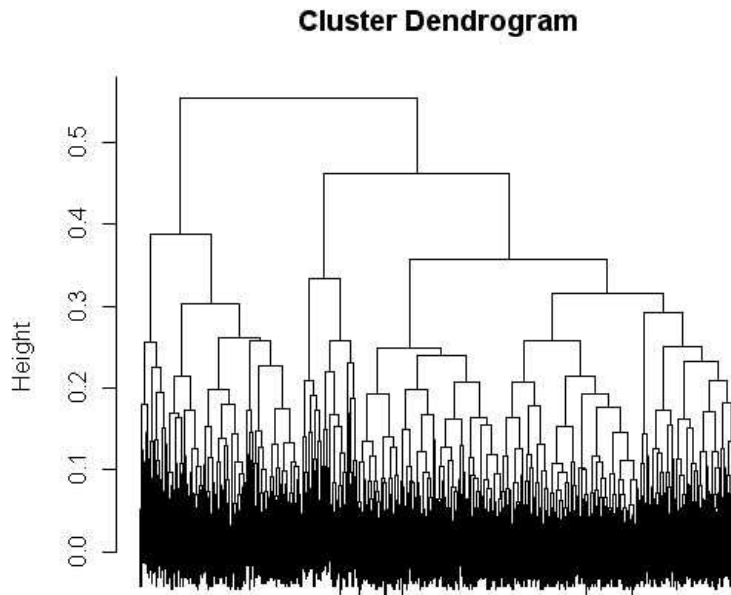
A belső és a középső-külső övben azonosított V-típusú kisbolygók optikai tulajdonságai némileg eltérnek. Utóbbiak főleg az i-z színtartomány felső határánál fordulnak elő (11. ábra). Ez a szín a 0.9-1 μm hullámhossztartományba eső piroxénvonal mélységét és központi hullámhosszát jellemzi. A vonal pozíciója a bazaltot alkotó piroxénfajták arányával hozható kapcsolatba. Például nagyobb kalcium és vas tartalom hatására a vonal a nagyobb hullámhosszak felé tolódik el. További oka lehet az eltérő szemcseméret is (Duffard et al. 2004).



11. ábra A vestoid jelölt kisbolygók $i-z$ színei a félnagy tengely függvényében.

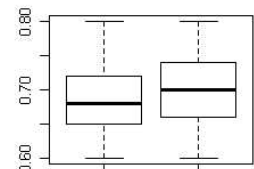
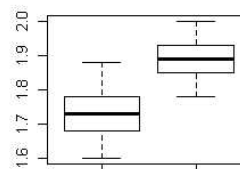
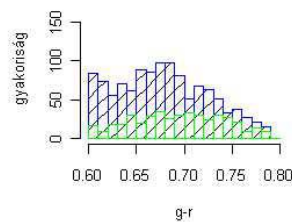
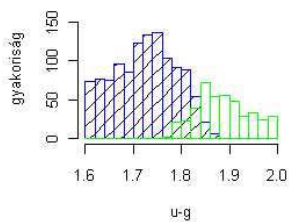
2. Hierarchikus felosztás

Ahogy a bevezetőben említettem, egyelőre nem tisztázott hogy a Vesta déli pólusán lévő kráter csak a kérget sértette fel, vagy a mélyebb, olivinban gazdag rétegig is leér. Utóbbi esetben a becsapódás során létrejött Vesta család tagjai között lehetnek részben vagy teljesen olivinból felépülő kisbolygók. Ez eltérő optikai tulajdonságokat eredményez. Emellett a kis inklinációjú pályán keringő vestoidokat nem sikerült dinamikai vizsgálatokkal megmagyarázni (Nesvorný et al.). A szerzők felvetették hogy ezek az égitestek egy korábbi becsapódás termékei. Ebben az esetben a hosszabb ideig kozmikus hatásoknak (space weathering) kitett kisbolygók színei megváltozhattak. Egy másik elmélet szerint nem is a Vesta kisbolygóról származnak, így optikai tulajdonságaik is mások lehetnek. Ezen kérdések megoldásában segítséget nyújthat a Vestához hasonló színű kisbolygók statisztikai analízise. Az adatsorok belső szerkezetének feltárására alkalmas eljárást, a hierarchikus klaszterezés módszerét használtam. A távolságot a mért négy szín euklideszi távolságával definiáltam. A hierarchikus klaszterezésnél a halmazok összevonásához a teljes lánc eljárást használtam, ez adta a legjobb eredményt. A kapott dendrogram:



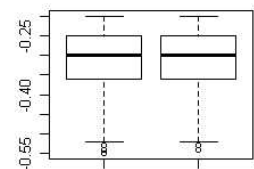
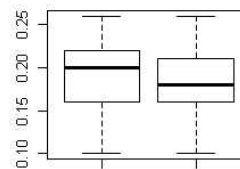
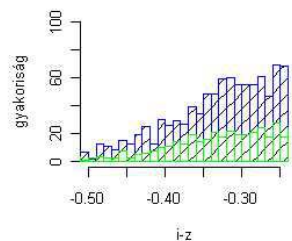
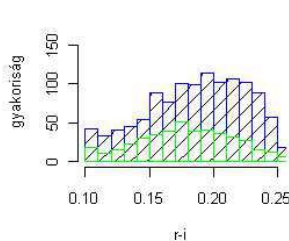
12. ábra. A hierarchikus klaszterezéssel kapott fa diagram.

A fenti ábrán két viszonylag elkülönülő klasztert lehet azonosítani. Ennek megfelelően kettéosztottam a mintát. Az egyes csoportok elemszáma 1166 illetve 433. Az első lépésben megvizsgáltam hogy a két klaszter színei miként oszlanak el a kiválasztási térfogatban. Ezen hisztogramokat a 13. ábra. mutatja



u-g a két alcsoportban

g-r a két alcsoportban



i-r a két alcsoportban

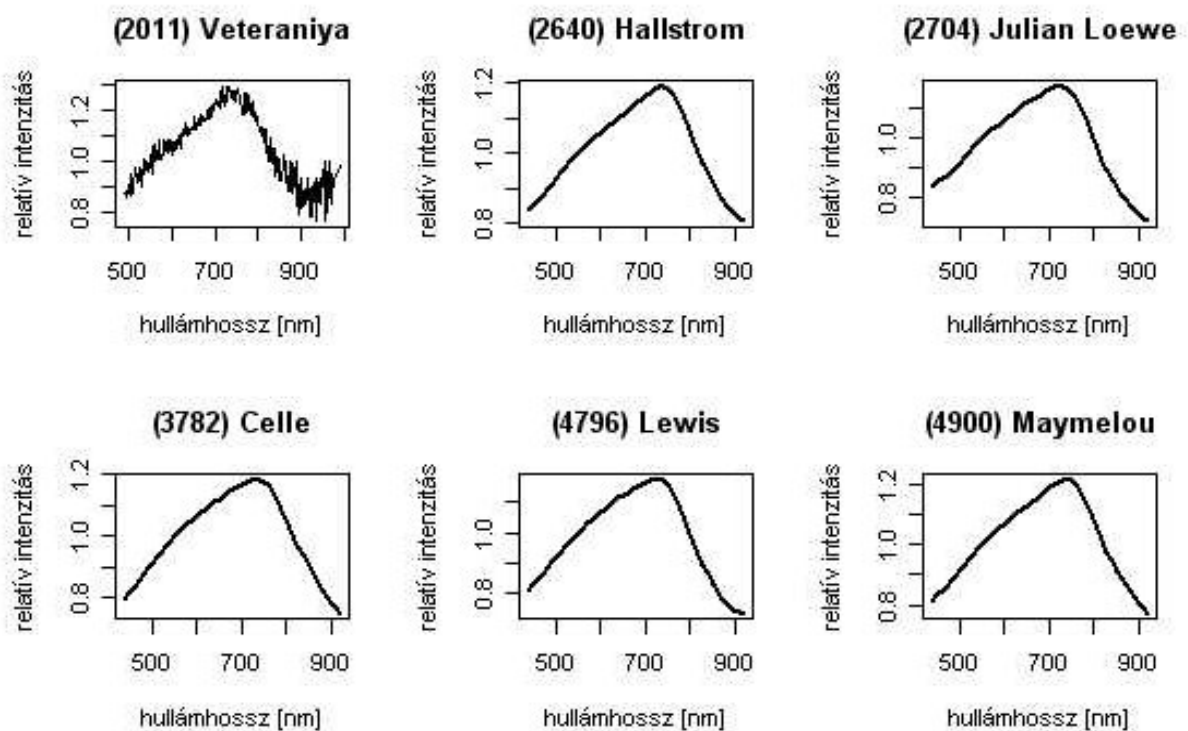
i-z a két alcsoportban

13. ábra. A két halmaz elemeinek eloszlása a négy színben, hisztogramokon ábrázolva.

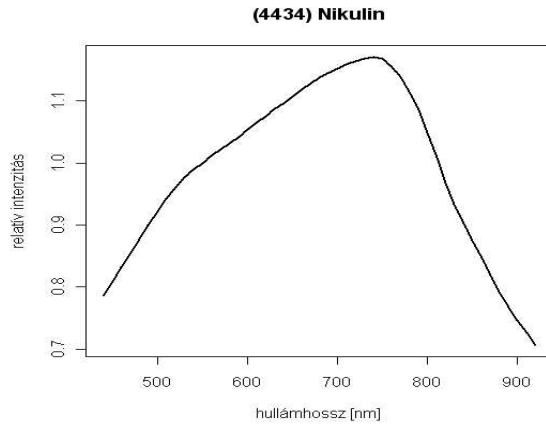
14. ábra. A két halmaz színei doboz diagramon.

Az egyes színek eloszlása még jobban szemléltethető egy doboz ábrán (box plot), lásd 14. ábra. Minden kis kép az adott szín viselkedését mutatja a két klaszterben. A középső széles vonal jelenti a középértéket. A „doboz” alsó és felső oldala az alsó és a felső kvartilis helyét jelöli. Az alsó kvartilis az szám, amelynél az adatsor egynegyede kisebb értékű. Hasonlóan a felső kvartilis az adatpontok háromnegyedét meghaladó értékkel rendelkezik. A diagramokon a két szélső vízszintes vonal jelöli a legkisebb és a legnagyobb előforduló értéket.

A fentiekből az látszik, hogy az azonosított két klaszterbeli elemek az u-g színben térnek el jelentősen. A többi sávban felvett értékeik hasonló eloszlást mutatnak. A színbeli eltérések pontosabb vizsgálatához az 5-szín fotometria nem elég pontos, optikai színeképekre van szükség. A szabadon hozzáférhető kisbolygó-spektrumok a két csoportra külön-külön ábrázolva (15. és 16. ábra) :



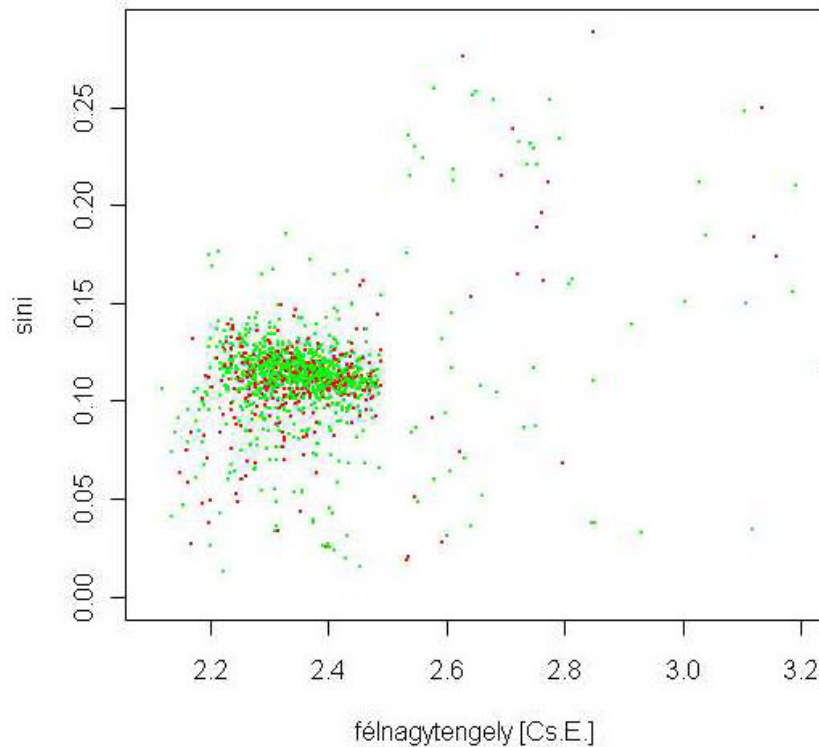
15. ábra. Az 1-es klaszterbe tartozó kisbolygók ismert színeképe.



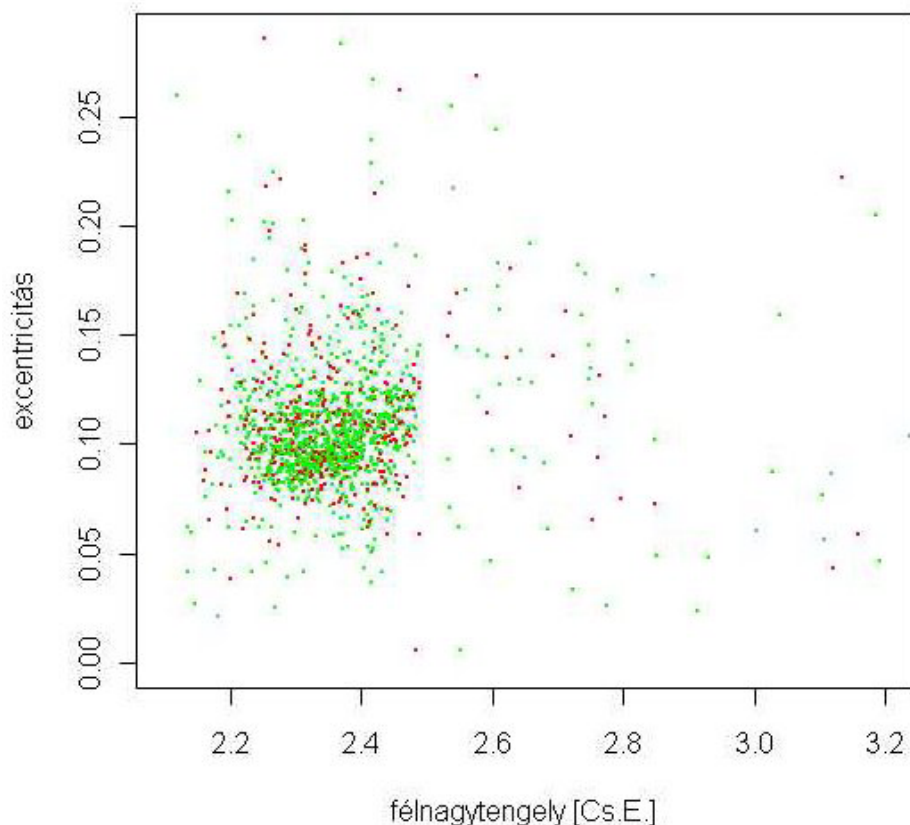
16. ábra. A 2-es klaszterbe eső kisbolygók egyetlen publikált spektruma.

Sajnálatos módon a második halmazból csak a (4434) Nikulin kisbolygóról rendelkezünk optikai spektrummal (16. ábra). A színeképeket összevetve, a Nikulin kisbolygó spektruma 500 nm-nél kiugró „púpot” mutat. Ez egybevág azzal, hogy a két klaszter az u-g színben tér el legjobban. Ettől eltekintve mindegyik spektrum karakteresen V-típusú.

A következő lépésben megvizsgáltam, hogy a két klaszter elemi a pályaelemek terében mutatnak-e bármiféle jellegzetes eloszlást. Az alábbi két ábrán ez látható, a két halmaz tagjai eltérő színnel ábrázolva:



17. ábra. A két klaszter tagjainak félnagy tengelye és pályahajlásuk szinuszja.



18. ábra. A két klaszter tagjainak félnagy tengelye és pályájuk excentricitása.

IV. Diskusszió

Ebben a szakaszban megvizsgálom, hogy a vestoid-jelöltek különböző csoportjai közötti eltérés mennyire tekinthető relevánsnak. A szín, pályaelem illetve a méret valamelyike szerint definiált csoportok mutatnak-e hasonló eltérést egy másik jellemzőjükben is?

A két klaszterbeli kisbolygók pályái látszólag nem mutatnak korrelációt. Mindkettő tartalmaz családbeli és középső/külső övbeli elemeket. Valamint egyaránt megtalálhatóak kis pályahajlású és elnyúlt pályákon is. A kérdés eldöntésére Székely-Rizzo tesztet alkalmaztam.. Munkámban a Zappalà és munkatársai által a kisbolygócsaládok azonosításánál használt, pályák közötti távolságot vettem alapul. A definíció:

$$\delta = n \cdot \bar{a} \cdot \sqrt{k_1 \cdot \left(\frac{\delta a}{\bar{a}}\right)^2 + k_2 \cdot (\delta e)^2 + k_3 \cdot (\delta i)^2}$$

Ahol a , e , i rendre a félnagy tengely, excentricitás és az inklináció, n jelöli a középmozgást, \bar{a} pedig két kisbolygó átlagos félnagy tengelyét. A k_i paraméterek értékei: $k_1=5/4$, $k_2=2$, $k_3=2$. A

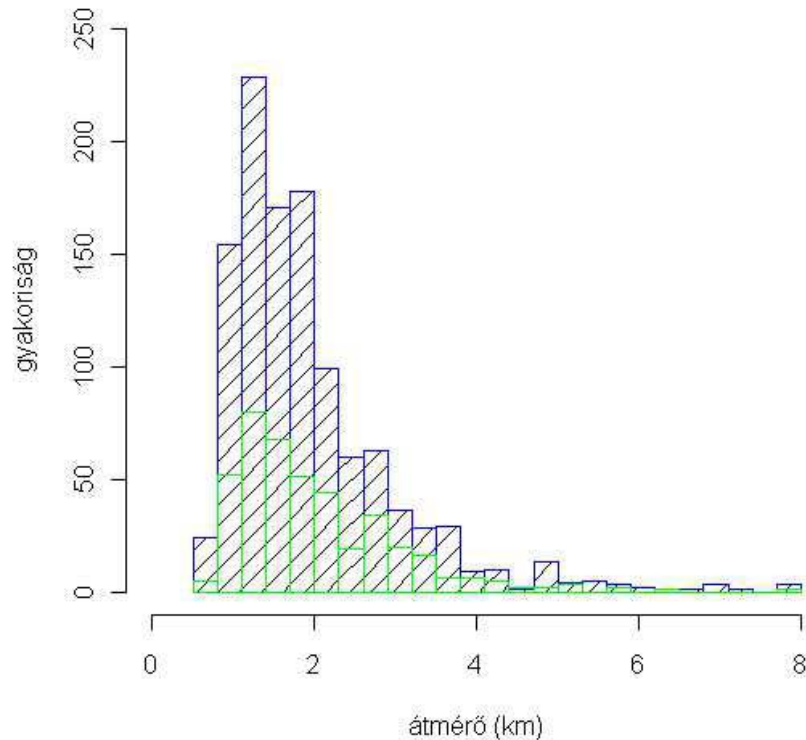
minél nagyobb pontosság eléréséhez nagy számú bootstrap mintavételt használtam (K=25000). A kapott p-érték: 0.2276, ami meghaladja szignifikanciaszinthez tartozó 0.05-ös küszöbszámot. A teszt alapján nem állítható, hogy a két klaszterbeli égitestek pályái eltérő eloszlást követnének. Elvégeztem a statisztikai próbát arra az esetre is, ha a dendrogramot úgy vágjuk el, hogy három mintát kapjunk. Az így nyert p-érték: 0.5227, tehát az eloszlások nem különböznek.

Az elméleti összefoglalóban jeleztem, hogy a dinamikai számításokkal nem sikerült reprodukálni az alacsony inklinációjú (6°) pályán megfigyelt V-típusú égitesteket. Egy lehetséges magyarázat, hogy ezen kisbolygók egy korábbi ütközés során csapódtak ki a Vestából. Ezért a 2 milliárd évet felölelő szimuláció során nem érik el jelenlegi pályájukat. Feltehető, hogy a két csoport optikai tulajdonságai eltérőek. Ez két okra vezethető vissza. Egyrészt a Vesta felszíne ásványtanilag heterogén (Carry et al. 2009). Így a különböző becsapódási kráterből származó aszteroidák összetétele eltérő lehet. Másrészt, a már hosszabb ideje önálló kisbolygóként létező égitestek felszínét a záporozás erősebben alakíthatta. Legyen az a nullhipotézisünk, hogy az összes V-típusú kisbolygó egyszerre keletkezett, így optikai jellemzőik azonos eloszlást követnek. Vizsgáljuk meg ezt az állítást az SDSS színei alapján elvégzett Székely-Rizzo teszttel. Vagyis az u-g, g-r, r-i, i-z színtérben a kisebb és a nagyobb inklinációjú vestoidok azonos eloszlást mutatnak-e? A kapott p-érték: 0.0561, ami nagyon közel esik az 5%-os küszöbhez. Ebből arra következtethetünk, hogy a két csoport között lényegi eltérés van. Ez az eredmény összhangban áll a Nesvorný és munkatársai által találttal. Az égi mechanikai szimulációkat sikerült alátámasztani egy tőlük független eljárással, a kisbolygók színei alapján.

Az utolsó vizsgálat a két V-típusú klaszter méreteloszlásával foglalkozik. Ez közvetve kapcsolatos a kisbolygócsalád korával. Ugyanis az idősebb családokból a kisebb aszteroidák a Jarkovszkij folyamat miatt már elfejlődtek. Egy kisbolygó méretének meghatározásához ismernünk kell az abszolút fényességét (H) és az albedóját (p). Előbbi értéket az SDSS katalógus tartalmazza a katalogizált aszteroidák esetén. Egy kisbolygó fényvisszaverő képességét a felszínét alkotó anyag határozza meg. Az albedó a különböző taxonómiai osztályok között tág határok között változik, de egy adott típuson belül állandónak vehető. A V-típusú aszteroidák albedója $p=0.37-0.42$ körüli érték. Ezen adatok birtokában az átmérőt a következő formulából kapjuk:

$$D = \frac{1347 \text{ km}}{\sqrt{p}} \cdot 10^{-0.2 \cdot H} \quad (\text{Moskovitz et al. 2008})$$

Mivel a kisbolygók alakja általában nem gömb, az így kapott érték egy karakterisztikus átmérőt jelöl. A kapott méreteloszlás a két klaszterben a 19. ábrán látható.



19. ábra. A két halmaz méreteloszlása.

Mindkét görbe 1 km-es átmérőnél maximumot mutat. Ez azonban egy észlelési kiválasztási effektus eredménye. A valóságban a kisbolygók száma a méret csökkenésével monoton nő. Ám egy kisebb égitestet jóval nehezebb észlelni, ez okozza a megfigyelt kisbolygók számának drasztikus csökkenését egy adott méret alatt. Annak eldöntésére, hogy a két csoportbeli égitestek mérete azonos eloszlást követ-e, Kolmogorov-Szmirnov tesztet alkalmaztam. A kapott p-érték: 0.1858, amely nagyobb mint a 0.05-ös küszöb. Tehát a teszt nem cáfolta meg a nullhipotézist, miszerint a két minta eloszlása azonos. Ebből arra következtethetünk, hogy a keletkezésük kora sem tér el jelentősen.

Az imént bemutatott hierarchikus klaszterezést és az azt követő összehasonlító analízist elvégeztem különböző távolságdefiníciók (euklideszi, maximum, manhattan) és halmaz összevonási eljárások (teljes lánc, átlagos távolság és ward-féle módszer) mellett. A kapott eredmények hasonlóak a fentebb leírtakhoz.

V. Összefoglalás

A kisbolygók egyik karakteres osztályát alkotják a V-típusú aszteroidák. Jellegzetes spektrumuk miatt könnyen megkülönböztethetőek más csoportoktól. Többségük egy belső övbeli kompakt család tagja. Ezek alapján a korai elképzelés szerint valamennyi a (4) Vesta kisbolygóból egy ütközés során kiszakadt töredék. Az elmúlt évtizedben számos olyan eredmény született, amely a fenti állítást megkérdőjelezi. A kérdés jobb megvilágítása érdekében az SDSS égboltfelmérés adatainak statisztikai vizsgálatát végeztem el. Az azonosított V-típus jelöltek a családon kívül is előfordulnak. Megvizsgáltam a színeik korrelációját a pályaelemekkel és a kisbolygók méretével. Ezen mennyiségek közötti összefüggés nem volt kimutatható, leszámítva a külső és a középső övbeli aszteroidák i-z színbeli eltérő viselkedését. A vestoid-jelöltek színeinek hierarchikus klaszterezésével két csoportot azonosítottam, ezek spektruma eltérést mutat az 500 nm-es tartományban. Statisztikai próbák segítségével összehasonlítottam a V-típusú kisbolygók alcsoportjainak színbeli és méretbeli eloszlását. A tesztek eltérő eloszlást jósoltak a kis és nagy inklinációjú V-típusú kisbolygók között. Ez az eredmény egybevághat egy a pályák szimulálásával kapottal (Nesvorný et al. 2008). Tehát a tágabb értelemben vett Vesta család nem olyan homogén, mint azt korábban hittük. Illetve ez egy újabb bizonyíték a vestoidok különböző időbeli keletkezésére. A kérdés pontos megválaszolásához vélhetően közelebb fogunk jutni a DAWN űrszonda mérései révén, amely 2011. júliusában éri el a Vesta kisbolygót.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni köszönetemet a témavezetőmnek, Dr. Szabó M. Gyulának, a segítséget, a hasznos tanácsokat és a tanúsított türelmet.

Köszönöm továbbá családomnak a biztatást és az önzetlen támogatást.

Nyilatkozat

Alulírott Somoskői Tamás, csillagász szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy szakdolgozatomat/diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

2011. május 12.

Irodalomjegyzék

- Asphaug, E. 1997, *Meteoritics Planet. Sci.*, **32**, 965-980.
- Baer, J., Chesley, S.R. 2008, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **100**, 27-42.
- Bell, J. F. 1998, *29th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, 1851.
- Bendjoya, Ph., Slézak, E., Froeschlé, C. 1991, *Astronomy and Astrophysics*, **251**, 312-330.
- Binzel, R. P., Xu, S. 1993, *Science*, **260**, 186-191.
- Burbine, T. H. & mtsai 2001, *Meteorites & Planetary Science*, **36**, 761-781.
- Bus, S. J., Binzel, R. P. 2002, *Icarus*, **158**, 146-177.
- Carry, B., Vernazza, P., Dumas, C., Fulchignoni, M. 2009, *Icarus*, **205**, 473-482.
- Davis, D. R., Chapman, C. R., Greenberg, R., Weidenschilling, S. J. 1982, *Bulletin of the American Astronomical Society*, **14**, 720.
- Duffard, R. & mtsai 2004, *Icarus*, **171**, 120-132.
- Duffard, R., Roig, F. 2009, *Planetary and Space Science*, **57**, 229-234.
- Duffett-Smith, P. 1992, *Practical Astronomy with Your Calculator*, Cambridge University Press, Cambridge
- Érdi B. 2003, *Természet világa*, **134** évf.,6.
- Federico, C., Frigeri, A., Pauselli, C., Coradlini, A. 2008, *Lunar and Planetary Science XXXIX*, 1719.
- Flynn, G. J., Durda, D. D., Minnick, M. A., Strait, M. M. 2010, *41st Lunar and Planetary Science Conference*
- Gaffey, M. J., Kelley, M. S., Hardersen, P. S. 2002, *Lunar and Planetary Science XXXIII*, 1506.
- Ghosh, A. 2010, *41st Lunar and Planetary Science Conference*, 2570.
- Greenwood, R. C. & mtsai 2009, *72nd Annual Meteoritical Society Meeting*, 5436.
- Gupta, G., Sahijpal, S. 2009, *40th Lunar and Planetary Science Conference*, 1530.
- Hardersen, P.S., Gaffey, M.J., Abell, P.A. 2004, *Icarus*, **167**,170-177.
- Harris, A. D. 2008, *Bulletin of the American Astronomical Society*, **40**, 498.
- Harris, A. W. 1979, *Lunar and Planetary Science*, **10**, 500-502.
- Hartmann, W. K., Tholen, D. J., Cruikshank, D. P. 1987, *Icarus*, **69**, 33-50.
- Hartmann, W. K. & mtsai. 1997, *28th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, 517.
- Hiroi, T. & mtsai. 2004, *35st Lunar and Planetary Science Conference*
- Ivezić, Z. & mtsai. 2001, *Astronomical Journal*, **122**, 2749-2785.
- Ivezić, Z. & mtsai. 2002, *The Astronomical Journal*, **124**, 2943-2948.

- Jurić, M. & mtsai. 2002, *Astronomical Journal*, **124**, 1776-1787.
- Lazzarin, M. & mtsai. 2006, *The Astrophysical Journal*, **647**, 179-182.
- Lazzaro, D. & mtsai 2000, *Science*, **288**, 2033-2035.
- Lazzaro, D. 2009, *RevMexAA (Serie de Conferencias)*, **35**, 1-6.
- Martel, L. M. V. 2007, *Planetary Science Research Discoveries*
- McFadden, L., Weissman, P. R., Johnson, T. V., (szerk.) 2007, *Encyclopedia of the Solar System*, Elsevier Inc., San Diego
- Michtchenko, T. A., Lazzaro, D., Ferraz-Mello, S., Roig, F. 2002, *Icarus*, **158**, 343-359.
- Moskovitz, N. A. & mtsai 2008, *Icarus*, **198**, 77-90.
- Münnich Á., Nagy Á., Abari K. 2006, *Többváltozós statisztika pszichológus hallgatók számára*, Debrecen
- Nesvorný, D. & mtsai 2008, *Icarus*, **193**, 85-95.
- Parker, A. & mtsai 2008, *Icarus*, **198**, 138-155.
- Pápay L. 1998, *Kristályok, ásványok, kőzetek*, JATE Press, Szeged
- Roig, F., Gil-Hutton, R. 2006, *Icarus*, **183**, 411-419.
- Roig, F., Nesvorný, D., Gil-Hutton, R., Lazzaro, D. 2008, *Icarus*, **194**, 125-136.
- Rubincam, D. P., Bottke, W. F., 2000, *31st Lunar and Planetary Science Conference*
- Ruzicka, A., Snyder, G. A., Taylor, L. A. 1997, *Meteoritics and Planetary Science*, **32**, 825-840.
- Schmidt, B. E., Castillo-Rogez, J. C. 2010, *41st Lunar and Planetary Science Conference*
- Schmidt, B. E., Moore, W. B. 2010, *41st Lunar and Planetary Science Conference*, 2700.
- Shoemaker, E. M., Williams, J. G., Helin, E. F., Wolfe, R. F. 1979, *Asteroids*, University of Arizona Press, Tucson
- Szabó M. Gy. 2005, *Kisbolygók és üstökösök fizikai paramétereinek meghatározása fotometriai módszerekkel*, Doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem
- Szabó M. Gy. 2009, *Statisztikai módszerek a fizikában* (előadásvázlat)
- Szepesváry P. 2002, *A matematikai statisztika elemei* (előadásvázlat)
- Székely J. G., Rizzo, M. L. 2004, *Testing for equal distributions in high dimension*, Interstat
- Tholen, D. J. 1984, Ph.D. Thesis Arizona Univ., Tucson.
- Thomas, P. C. & mtsai. 1997, *Science*, **277**, 1492-1495.
- Vilas, F., Cochran, A. L., Jarvis, K. S. 2000, *Icarus*, **147**, 119-128.
- Wasson, J. T. 1995, *Meteoritics*, **30**, 595.
- Wasson, J.T., Chapman, C.R., Grogan, K., Dermott, S.F. 1996, *Lunar and Planetary Science*, **27**, 1387-1388.

Weidenschilling, S. J. 1975, *Icarus*, **26**, 361-366.

Williams, J. G. 1989, *Asteroids II*, University of Arizona Press, Tucson

Yamakawa, A., Yamashita, K., Makishima, A., Nakamura, E. 2010, *The Astrophysical Journal*, **720**, 150-154.

Zappalà, V., Cellino, A., Farinella, P., Knevežić, Z. 1990, *Astronomical Journal*, **100**, 2030-2046.