



Üstökösök

A Nagy Becsapódás megfigyelése a CARA észlelőhálózattal

A Meteor korábbi számaiban hírt adtunk a CARA észlelőhálózat megalakulásáról, működéséről, technikai hátteréről, méréseinek céljáról. Ennek a mostani cikknek a célja, hogy – alapszintű áttekintés után – bemutassa a Nagy Becsapódás megfigyelését 2004. július 4-én, illetve a 9P/Tempel 1-üstökös 2004-es teljes láthatóságának fényében elemezze a tapasztalatokat. A munka kizárólag amatőr csillagászok megfigyelésén alapult, és az adatok feldolgozása, sőt, értelmezése is sok esetben az ő érdemük. Az adatok internetes közlése alapján a Deep Impact kutatócsoport felkérte a CARA észlelőhálózatot egy cikk írására, amely a Naprendszerrel foglalkozó Icarus című csillagászati folyóirat Deep Impact különszámában (DI Special Volume) jelenik meg. Jelen cikk e munka alapján készült.

A 9P/Tempel 1-üstökös a Jupiter-családba tartozik, 5,4 éves periódussal, 1,4 Csillagászati Egység perihélium-távolságú pályán kering, a Jupiterrel középmozgás-rezonanciában. A Deep Impact (DI) 2005. július 4-én megközelítette az üstökös magját, és 400 km távolságban elrepült mellette. Közben egy 615 kg súlyú lövedékét indított útjára, amely a magba csapódott. A szonda elsődleges feladata a felszín megfigyelése és a robbanás hatásainak figyelemmel kísérése volt.

A DI csoport korábbi adatai alapján az üstökös gyors lefolyású jelenségeket produkál (rövid kitörések, anyagsugár-szerkezetek), ezért a teljes láthatóságot lefedő folyamatos megfigyelés igen kívánatos volt. Ebbe a munkába kapcsolódott a CARA észlelőhálózat, amely megalakulásától fogva az üstökösök folyamatos CCD-s nyomon követését tűzte ki célul. Az észlelőhálózat tagjai képzett amatőr csillagászok, a használt távcsövek jellemző átmérője 20–60 cm között volt. 2005 végéig a CARA 3000 fotometriai pontot gyűjtött mintegy 30 üstökösről, az észlelési kampány miatt az adatok harmada a Tempel 1-üstökösről született.

A kampány célja az Afp mennyiség megfigyelése volt (Meteor, 2005/4., 28. o.). Ez a fotometriai jellemző a használt műszertől és a geometriai viszonyoktól teljesen, a fotometriai apertúrától nagyjából függetlenül méri az üstökösben lévő por látszó felületét; vagyis csak a portermelésről és a részecskék méretétől függ. A mennyiség a részecskék relatív kitöltési tényezője az albedóval súlyozva, definíciója:

$$Afp = 4D^2 R^2 / \rho \cdot (F_u / F),$$

ahol D és R az üstökös földtávolsága cm-ben (D) és naptávolsága Csillagászati Egységben (R), ρ a fotometriai apertúra mérete cm-ben, F_u az üstökös fénytéljesítménye, F pedig a Nap fénytéljesítménye 1 Cs.E. távolságból, ugyanabban a fotometriai rendszerben, amelyben az üstökös fényességét mérjük. Bár a mennyiség megnevezése

pontos, a képlet és a jelentése kissé absztraktnak tűnik. Ám akkor sem járunk el nagyon szakszerűtlenül, ha az alábbiakban „Afp” helyett következetesen a hétköznapibb „portermelés-szám” szót olvassuk.

A mennyiség az abszolút fényességgel rokon (a képlet is teljesen hasonló), segítségével egyszerű fényességméréssel egy nagyon fontos fizikai jellemzőre lehet következtetni. Bár nehézséget okoz a „rettenetes” mértékegység-rendszer, és a kimérés többi szakaszában is el lehet követni hibákat, megfelelő számítástechnikai programmal ezek a hibalehetőségek kiszűrhetők. Erre a célra fejlesztettük ki az XAfrho/Winafrho programot, amely a CARA honlapjáról letölthető (cara.uai.it). Az üstökös neve és a megfigyelés dátuma alapján a program a geometriai adatokat kiszámítja, és már csak az alkalmas összehasonlító csillag kiválasztása szükséges a fotometria elvégzéséhez. A csatlakoztatott katalógusok alapján mindez gyakorlatilag „egérkattintással” műveletfolyamattá válik, amelynek végén a CARA standard formátumába szerkesztve fájlba irányítható a mérés eredménye.

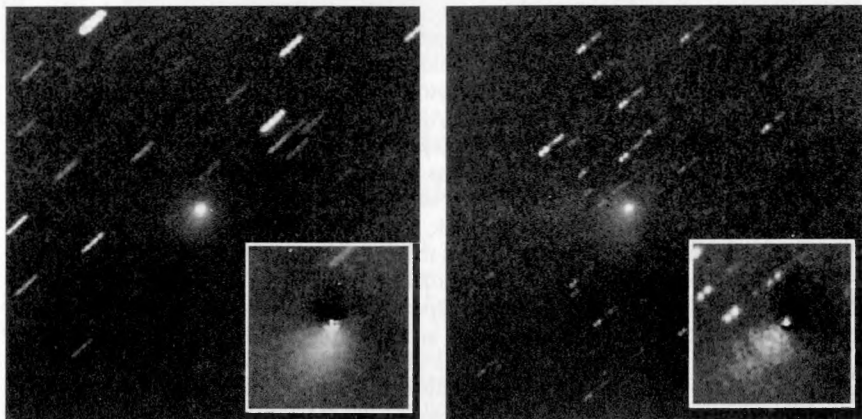
Az Afp mennyiségi a kómában kissé változik, ezért a mérést több különböző apertúrával kell elvégezni, és természetesen az apertúra mérete is fontos paramétere a mérés dokumentálásának. A bonyolultabb analízis helyett elég annyit megjegyezni, hogy az üstökösök kómájának fényessége általában hatványfüggvényt követ. Ezért az Afp – ρ grafikon kétszer logaritmikus ábrázolásban egy egyenes, amelynek meredeksége utal a hatványkitevőre is. Abban az egyébként elég gyakori esetben, amikor az anyagiáramlás térben és időben egyenletes, és külső hatások nem torzítják a kómát, a fényességprofil $1/\rho$ lefutású (a hatványkitevő -1). Ekkor az Afp mennyiség teljesen független az apertúra méretétől!

A méréshez elengedhetetlen fotometriai szűrők használata, nehogy az üstökös valamely fényes, gáztól származó emissziós vonalát is belemérjük a por fényességébe. A méréshez számos szűrő használható, ezek szerencsére már az amatőr csillagászok számára is elérhető áron kaphatók.

A Tempel 1-üstökös megfigyelését 26 észlelő végezte Olaszországból, Argentínából, Ausztráliából, Belgiumból, Szlovéniából és az Egyesült Államokból. A becsapódás előtt 473, utána 225 adatpontot gyűjtöttünk, a becsapódás 3 napos környezetébe 86 adatpont esik. Az észlelők minden megfigyeléskor számos képet készítettek, amelyeket standard képfeldolgozás után átlagoltak. A kiméréshez javasolt apertúrák mérete 50 000, 25 000 és 12 500 km sugarú volt, napközelség idején kiegészítve 6000 és 3000 km sugarú apertúrákkal is. Az összehasonlító csillagokat általában a Hipparcos-katalógusból vették, amely nem elsődleges forrása a fotometriai összehasonlítóknak, ám előzetes tesztek szerint az egyéb hibák és a várható változások nagyságrendje alapján elfogadható kompromisszum. A választás előnye, hogy a látómező közelébe általában esett egy-egy megfelelő csillag, ami az adatok redukcióját nagyon megkönnyíti (a légköri fényelnyelésre nem kell korrigálni).

A Tempel 1-üstökös megfigyeléseit egybevetettük a korábbi láthatóságok publikált eredményeivel. Az üstökös keringési idejéből adódóan a jelentős földközelségek 11 évente következnek be, és az elmúlt időszakban mindig július–augusztusra estek. Ez nagyon hasonló geometriához vezet, ami egyrészt megkönnyíti az adatok egybevetését, másrészt hátrány is, mert a geometriai hatások megállapítására nincs lehetőség. Itt különösen a szoláris fázis változásának hatása érdekes, hiszen ez befolyásolja a porszemcsék látszó megvilágított területének arányát, tehát a por fényességét is. Az elemzés során ezért szoláris fázisra korrigálatlan értékek szerepelnek, ám ha pár évti-

zed múltán lehetőség lesz a fázis változásának megbecsülésére is, ezeket az adatokat egyszerűen lehet korrigálni. (Hozzávetőleges korrekció azonban most is végezhető: a szoláris fázis hatása az üstökösök fényességére általában 0,0275 mag/fok körüli.)



A Tempel 1-üstökös megzavart szerkezetű kómája 2005. július 5,85-én (balra) és négy nap múlva. Figyeljük meg a kóma változásait az inzertben, amely hangsúlyozza a szimmetriától való eltéréseket!

Általános jellemzés a becsapódás előtt. A megfigyelőkampány kezdetén (2004 végén) az üstökös majdnem csillagszerű volt. 2005. január–február környékén fejlődött ki az eszközeink segítségével is észlelhető kóma, amely májusra, a földközelség idejére 5 ívperc (75 000 km) méretűre növekedett.

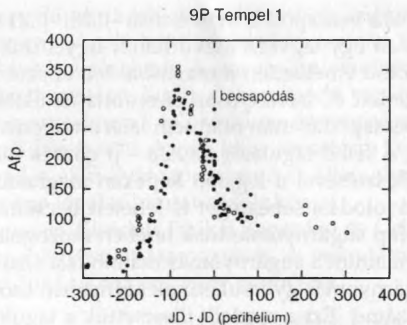
Az üstökös fejlődését összevetve a korábbi (1983, 1987, 1994, 1997–2000, fotoelektromos és CCD) mérésekkel, a portermelés fejlődésének nagyfokú hasonlósága szembeötlő. Részletesebb analízissel azonban kimutatható, hogy 2005-ben az Afp-görbe felszálló ága mintegy 20 nappal „el volt maradva” a korábbi időszakok megfigyeléseihez képest, vagyis ugyanazt a szintet nagyjából ennyi idővel később érte el. Az összes megfigyelés időszakára jellemző, hogy az Afp a maximális értéket kb. 85 nappal a perihélium előtt már elérte, utána egész lassú, majd a perihélium elhagyása után gyors elhalványodás következett be. A különös viselkedés mögött részben a szoláris fázis hatása áll. Ha ad-hoc módon 0,0275 magnitúdó/fok (azaz közepes mértékű) korrekciót alkalmazunk, a –85 nap és perihélium közötti szakasz csökkenő helyett egy konstans platóvá alakul, a perihélium utáni csökkenés viszont felgyorsul, és fordított előjellel nagyjából eléri a felszálló ág ütemét. Viszont realizztikus mértékű korrekcióval nem lehet elérni, hogy a perihélium egyértelmű maximummal essen egybe. A víz termelése, mint azt spektrofotometriai megfigyelésekből tudjuk, pontosan ugyanezt a viselkedést követi. Úgy tűnik tehát, hogy az üstökös anyagtermelésében valamiféle plató már 3 hónappal a napközelség előtt bekövetkezik, majd a napközelség után azonnal csökkenni kezd a portermelés. Ennek a jelenségnek a magyarázata egyelőre kérdéses.

Az üstökös kómájának szerkezete közepeken kompakt, $-0,5$ kétszer logaritmusos Afp meredekségű állapotból lassan egy „teljesen szabályos”, 0 meredekségű kómává fejlődött. Azonban itt nem figyeltük meg a korábbi platót, a 0 értéket folyamatosan növekvő tendenciával mindössze pár nappal a napközelség (és a becsapódás) előtt érte el.

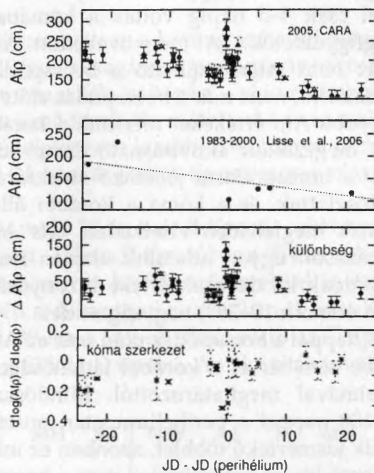
A becsapódás. A becsapódás előtti utolsó kép 15 perccel az esemény előttről származik, a következő kép 15 órával későbbi. Ezért a becsapódás rövid időskálájú folyamatait nem tudtuk megfigyelni. Adataink célja viszont nem is ez, a DI közeli megfigyeléseivel nehéz is lett volna versenyezni: a becsapódást és annak hatásait inkább közepes időskálán tudjuk elemezni, úgy, mint az üstökös láthatóságának egy fejlődési állapotát.

A becsapódás 1,3163 nappal a perihélium előtt történt. A becsapódáskor az Afp növekedését figyeltük meg, ennek mértéke elérte a 60%-ot, de pár nap múlva visszaállt a szokásos aktivitási szint. Azért, hogy a becsapódáshoz tartozó többlet anyagtermelést pontosabban vizsgálhassuk, az üstökös korábbi láthatóságaiban tapasztalt „viselkedését” levontuk a becsapódást tartalmazó adatsorból. Ennek menete pontosabban fogalmazva az volt, hogy a korábbi adatsorban a perihéliumtól számítva ± 25 napos környezetben az Afp alakulása egyenessel közelítettük, és ezt az egyenest vontuk le a 2005-ös láthatóság adatpontjaiból. Bár az így előálló reziduálok néhol kicsit „elhúznak” a pozitív oldalra, a megfigyelendő effektus meghatározható mértékét radikálisan már nem befolyásolják.

A becsapódás előtt az Afp értéke 175 cm volt, ami hirtelen 280 cm értékre növekedett. A többlet gyorsan elfogyott: a becsapódás után 0,65, 0,94 és 1,93 nappal az Afp értéke 105 cm, 55 cm és 15 cm-rel volt a normál aktivitási szint fölött. Ezek alapján a portöbblet látszó felülete $8,2/A$, $4,3/A$, $1,2/A$ négyzetkilométer volt, ha A a porszemcsék albedója (4% albedót feltételezve tehát 205, 108 és 30 négyzetkilométer.) A becsapódás a kóma szerkezetét is megváltoztatta. A logaritmusos profil hirtelen kissé kompaktabbá vált, 1,58, 1,64 és 5,61 nap-



Az Afp változása a 2004/2005-ös láthatóság folyamán (pontok), összehasonlítva a korábbi láthatóságokkal (üres karikák)



Az Afp változása a becsapódás környékén, a korábbi láthatóságok megfelelő időszakában, és a kettő különbsége mint a becsapódás eredménye. Legalul: a kóma szerkezetének változásai

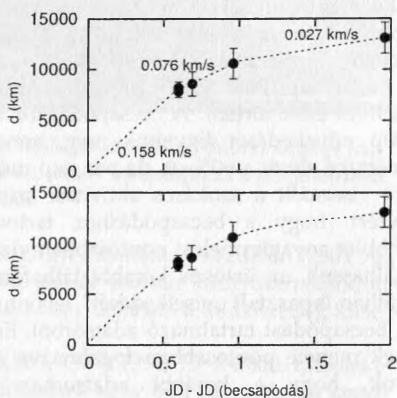
pal a becsapódás után értéke $-0,28$, $-0,21$ és $-0,08$ volt. Ezzel egy időben, július 4-én és 5-én egy legyező alakú felhőt figyeltünk meg a képeken, amely a becsapódás helye fölött emelkedett a magasba. Mivel ez a kóma-csóva vonalhoz képest oldalt helyezkedett el, látványosan elrontotta az üstökös addigi tengelyszimmetriáját. 4 nappal a becsapódás után már nem látszott nyoma a felhőnek.

A felhő tágulását az Afp – ρ görbék időfejlődésén is követni lehetett. A maximum illesztésével a legjobb képeken meghatározható volt annak helyzete, ebből vetületi távoldási sebességet is lehetett becsléni. A szökőkút-modellben a porrészecskék a Nap sugárnyomásának terében mozognak, a modell paraméterei a kezdeti sebesség, valamint a sugárnyomás csatolóási állandója, b . (Ezt a gravitációs gyorsulás és a sugárnyomás gyorsulásának arányában szokták megadni, így dimenziója „egyszerűen” szám.) Ezt a modellt illesztettük a táguló felhőre, ami alapján a kezdeti sebesség $0,2$ km/s körüli volt (vetületben), a b értéke pedig $0,7$. A sebesség jó egyezésben van a DI adataival is, a b értéke pedig arra utal, hogy az általunk megfigyelt felhőben aprószemcsés (pár mikrométer méretű) por dominált.

Becsapódás utáni események. Bár a becsapódás után néhány napig az Afp kis mértékben emelkedett szintjét figyeltük meg, az adatok alapján a becsapódás hatásai csak 4–5 napig voltak a kómában megfigyelhetők. (A megnövekedett Afp azért nem interpretálható a becsapódás hatásaként, mert már a becsapódás előtt is nagyobb Afp értékeket mértünk a korábban megszokott aktivitásnál.) Ennyi idő alatt a becsapódásra jellemző struktúrák szétesztek, és a kóma a korábbi állapotnak megfelelően viselkedett. Kis Afp változások ugyan adataink alapján nem zárhatóak ki, de ezek értéke bizonyosan nem érte el a 10–20% nagyságrendet.

15 nappal a becsapódás után már az Afp görbe sem tér el a korábbi láthatóságok alkalmával meghatározottól. Mindössze 50–100 nappal a perihélium után mutatkozik kismértékű többlet, azonban ez inkább az aktivitás eseti jellegű növekedésének tudható be, és valószínűleg nem a becsapódás utóhatása. Ezt megerősíti, hogy a korábbi láthatóságok alkalmával is előfordultak hasonlóan megnövekedett aktivitások a perihélium után.

Következtetések. A megfigyelések alapján elmondható, hogy a becsapódás nem okozott olyan kataklizmikus eseményeket az üstökösben, amint azt esetleg korábban várni lehetett. A becsapódás az üstökös portartalmanak nagyságrendileg 60%-os növekedésével járt együtt, ez azonban 4–5 nap alatt eloszlott. A kóma is kompaktabbá vált, aminek oka a táguló anyagfelhő haladása kifelé, majd annak eloszlása volt. Azonban ennek a „kompaktosodásnak” a mértéke is alatta maradt annak a szerkezetváltozásnak, ami az üstökös normál aktivitásában bekövetkezett a becsapódás előtti mindössze 4–5 hét alatt. A becsapódás nem járt új aktív terület keletkezésével,



A becsapódás által kidobott anyagfelhő távoldása a magtól. Fent: átlagsebességek, lent: szökőkút-modell alapján

és nem változtatta meg a kóma szerkezetét sem középtávon, sem a láthatóság végére. A megfigyelések meglepő konklúziója az, hogy a táguló felhő dinamikája alapján az üstökösből kirobbanó por igen apró szemcsés anyag lehetett. A por magra vetett árnyéka alapján a DI csoport ugyanerre a következtetésre jutott. A becsapódó egység energiája ugyanakkor biztosan nem volt elég arra, hogy a kilökődő pormennyiséget homogén közetből, vagy sóderszerű anyagból létrehozza. Arra a következtetésre kell tehát jutnunk, hogy ez a por már a becsapódás előtt ilyen aprószemcsés állapotban volt az üstökösben. Ennek magyarázata azonban jóval túlmutat cikkünkön.

A szerző köszöni a Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszéke és Csillagvizsgálója, valamint az Olasz Csillagászati Egyesület támogatását. A bemutatott kutatásokat az OTKA T042509 és a Magyary Zoltán Közalapítvány támogatta.

DR. SZABÓ M. GYULA

Folytatás a 28. oldalról! (Nap)

Ekkorra a 907-es és 908-as csoportok már a nyugati peremre kerültek, körülöttük fáklyamező figyelhető meg, típusuk A, illetve B. 13–14-én lefordulnak a korongról, közben valószínűleg el is hálnak. A 908-asban az umbra a változatosság kedvéért babszem alakú, az északi oldalon van a „csíranak” megfelelő öböl. Változatlan formában nyugszik 17-én.

Egy nappal később a délkeleti negyedben (nem messze a korong szélétől) megjelenik a 910-es aktív terület -8° -on. Kezdetben J típusú magányos penumbrás monopolár. Egészen 22-ei CM átmenetéig nem mutat semmiféle változást – ekkor kisebb pórusok jelennek meg körülötte, így típusa C-re módosul, de mérete ekkor is csak 50 MH. A legnagyobb komponenstől nyugatra ideiglenesen kisebb, É–D irányú pórúsív figyelhető meg, mely azonban 23-ára eltűnik. 24-én már csak A típusú monopolár, 25-én elhal.

26-án kel a 911-es AA $+7^\circ$ -on. Kezdetben A, majd 28-án már B típusú – ekkor megjelenik még nem sokkal mögötte a 913-as terület -18° -on (J típusú) és a 914-es AA -7° -on (pórus). Ezek közül csak a 913-as látható könnyen kisebb műszerekkel is, és körülötte van csak fényesebb fáklyamező. 29-én a délnyugati negyedben is felbukkan egy csoport – a 915-ös AA -6° -on (C típusú). 30-ára a 912-es elhal, a 913-as C típusú (mágneses tere emellett $\beta-\gamma$), a 914-es J, míg a 915-ös D típusú. Az aktivitás továbbra is minimális...

| Nap | AA | R | MH | SZ | Nap | AA | R | MH | SZ | Nap | AA | R | MH | SZ |
|-----|----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|----|----|-----|----|
| 1 | 2 | 32 | 190 | 0 | 11 | 3 | 42 | 250 | 1 | 21 | 1 | 11 | 10 | 0 |
| 2 | 2 | 27 | 120 | 0 | 12 | 3 | 41 | 220 | 1 | 22 | 1 | 17 | 50 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | - | 13 | 3 | 38 | 270 | 1 | 23 | 1 | 13 | 20 | - |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 2 | 25 | 220 | 1 | 24 | 1 | 13 | 30 | - |
| 5 | 2 | 26 | 130 | 0 | 15 | 1 | 12 | 180 | - | 25 | 1 | 11 | 10 | 0 |
| 6 | 3 | 53 | 280 | 0 | 16 | 1 | 13 | 190 | - | 26 | 1 | 13 | 30 | 0 |
| 7 | 3 | 39 | 260 | 0,5 | 17 | 1 | 11 | 120 | 0 | 27 | 1 | 11 | 20 | 0 |
| 8 | 3 | 49 | 330 | - | 18 | 1 | 11 | 30 | - | 28 | 3 | 36 | 120 | 0 |
| 9 | 3 | 51 | 340 | 1 | 19 | 1 | 11 | 30 | - | 29 | 4 | 51 | 180 | 0 |
| 10 | 3 | 50 | 320 | 1 | 20 | 1 | 11 | 10 | - | 30 | 3 | 38 | 180 | 0 |

PÁPICS PÉTER