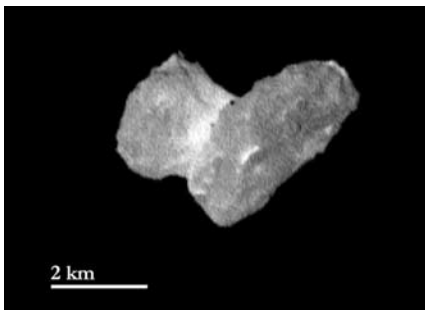


Üstökös napközelen

Az Európai Űrügynökség (ESA) Rosetta űrszondája 2014. augusztus 6-án megkezdte a 67P/Churyumov–Gerasimenko-üstökös magjának és közvetlen környezetének hosszú időtartamra tervezett kutatását. A Rosetta Philae leszállóegysége 2014. november 12-én, bár kalandosan, de simán leszállt a 67P magjának felszínére. Bár 2005-ben a NASA Deep Impact űrkísérlete során egy próbatest már elérte egy üstökös magját, becsapódott a 9P/Tempel-üstökösbe, de az nyilván nem tekinthető leszállásnak, így a Rosetta leszállóegysége volt az első emberkéz alkotta eszköz, amely landolt egy üstökös magján.



A 67P magja 2014. július 29-én a Rosetta OSIRIS képfelvévő rendszerének kislátózógó kamerájával készített felvételén.

Az 1950 km-es távolságot az üstökös mag felszínén egy képelem 37 méternek felel meg (ESA/Rosetta/MPS, OSIRIS MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA)

A 67P magjának jellemzői

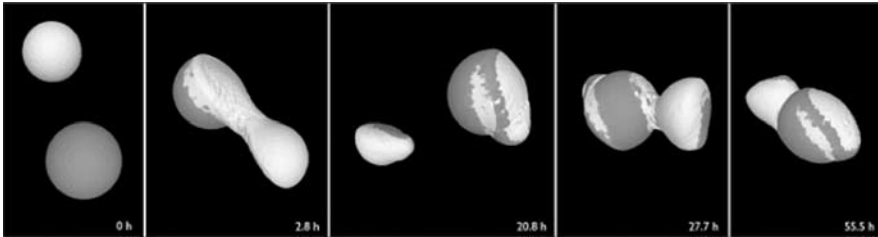
Azt, hogy miként válik aktívvá egy üstökös a Naphoz közeledve, pontosan milyen az aktivitás mechanizmusa, honnan és hogyan jön ki az üstökös mag felszínéről a gáz és a por, csak akkor tudjuk megállapítani, ha egy űrszondát küldünk az üstökös mag közelébe, és ez a szonda már nagy távolságra a Naptól megkezdte vizsgálatait. A Rosetta és Philae leszálló modulja pontosan ezt a célt tűzte maga elé. Utóbbi műszereinek és berendezéseink elkészítésében magyar kutatók is részt

vettek, ami a hazai műszaki és tudományos kutatás nemzetközileg is elismert magas színvonalát mutatja.

A Rosetta képfelvévő rendszerei tavaly nyáron egy nagyon furcsa, látszólag két kisebb testből összetett égitestnek mutatták meg a 67P magját. Krumpli, gumikacsa, löszbaba (egy geológiai formáció), bakancs és még ki tudja milyen hasonlattal illették formáját. Az ilyen két komponensből álló kis égitesttípus nem ismeretlen a Naprendszerben. A 19P/Borrelly, a 103P/Hartley ekliptikai üstökösök, illetve a 8P/Tuttle Oort-felhőből származó üstökösök is érintkező kettősök, de a (4769) Castalia és a (25143) Itokawa kisbolygók is hasonló példák lehetnek. A 67P két kisebb komponense igen lágyan, legfeljebb néhány méter másodpercenkénti relatív sebességgel ütközhetett és tapadhatott össze, ha ez a magyarázat létrejöttére.

Foglaljuk össze röviden, hogy 2015 első felévéig bezárólag mit tudtunk meg a 67P magjának általános tulajdonságairól, aktivitásáról! A korai felvételeken az üstökös magot alkotó két tömböt elválasztó nyaki részen egy fényes, gallérszerű alakzat látszott. Kezdetben az egyre erősödő gáz- és porkibocsátás a két összetevőt elválasztó területen volt a legnagyobb, vagyis ez a nyaki rész igen fontos aktivitási terület, és az üstökös keletkezési körülményei, további sorsa szempontjából is figyelemre méltó.

A 67P kisebbik része $2,6 \times 2,3 \times 1,8$ km méretű, a nagyobbik $4,1 \times 3,3 \times 1,8$ km-es, térfogata 21,4 köbkilométer. A rádióbemérésekből meghatározott tömege mintegy tízmilliárd tonna (10^{13} kg), a térfogat figyelembevételével meghatározott átlagos sűrűsége pedig 470 kilogramm köbméterenként. Mivel a tömör poros vízjég sűrűsége 1500–2000 kg köbméterenként, a mag térfogatának 70–80%-a porózus, üreges szerkezetű lehet, de nincsenek a belsejében nagy üregek, porozitását a laza szerkezetű anyag jelenti. Az üstökös mag



A 67P üstökös magja és más, hasonló kis égitest két összetevő test lágy ütközéssel történő kialakulási folyamata: 1) a két kis test lassan közelíti egymást és összetapad, 2) egy elnyújtott testet alkot, ami 3) szétválik, majd ezután rövid időn belül 4) ismét összetapad, és ezzel kialakul a 5) „gumikacsa” alak (Jutzi és Asphaug munkája alapján)

xid és szén-monoxid is hozzájárult a gázokhoz, mert kizárólag víz esetén elméletileg 6 ± 2 lenne a por/gáz tömegarány. Előzetes becslések szerint a tömegarány a napközelsége idejére 3-ra csökken, mivel a perihélium környékén a kiszabadult porszemcsékhez tapadt jegek gyorsan szublimálnak, gáztartalmukat elvesztik, tehát a tömegarány meghatározásához a porszemcsék gáztartalmát is figyelembe kell majd venni.

A mágnesestér-mérések szerint a 67P magjának nincs saját mágneses tere. A Rosetta plazmamérései által megfigyelhető volt az üstökös magnetoszférájának születése, vagyis a napszél-üstökös kölcsönhatások érzékelése nagy távolságban jelezte az üstökös mag erősödő vízkibocsátását. Meglepő volt, hogy nagy energiájú semleges atomokat is érzékelték a műszerek, amit ilyen nagy naptávolságban még nem vártak. Ennek magyarázata még a jövő feladata.

Az üstökös magjának kialakulása

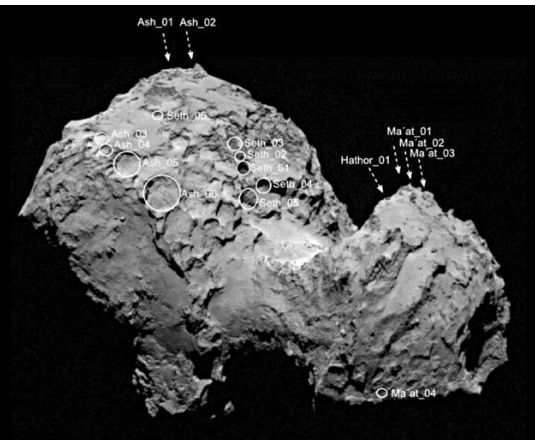
Alapvető fontosságú kérdés, hogyan is alakulhatott ki a 67P érdekes alakú magja? Fentebb már utaltunk rá, hogy első ránézésre két kisebb test összetapadásáról lehet szó. Azonban nem csak összetapadás eredményezhet hasonló alakot, hanem az üstökös mag napközeli erős aktivitása, anyagvesztése is, amidőn a Nap szinte „leesztergálja” a felszínt egy sávja mentén, egyre mélyebben és mélyebben. Nagyobb anyagvesztéssel járó kitérések is fogyasztják, soványítják az üstökös magot. Az is elképzelhető volt, hogy egy nagyobb ütközés következtében szakadt le,

veszett el anyag az üstökösből, vagy egy nagybolygó árapályhatása szakított le anyagot róla, de ezen események valószínűsége igen kicsi. Valószínűleg a mag keletkezésével, illetve fejlődésével kapcsolatos belső okokra vezethető vissza a ma megfigyelhető alak.

Kutatók számítógépi szimulációval előállították a 67P magjának térbeli modelljét. A modellben a két, kis relatív sebességgel egymásnak ütköző test méretét, összetételét, sűrűségét, rugalmassági paramétereit a 67P és más ismert üstökösök tulajdonságainak figyelembe vételével választották meg. Eredményük szerint a hasonló kis égitesteket lágy ütközéssel történt összeállás alakította ki, és nem a gáz- és porkibocsátás miatt történt anyagvesztés. Ez a folyamat egyébként gyakori lehetett az ősi Naprendszerben.

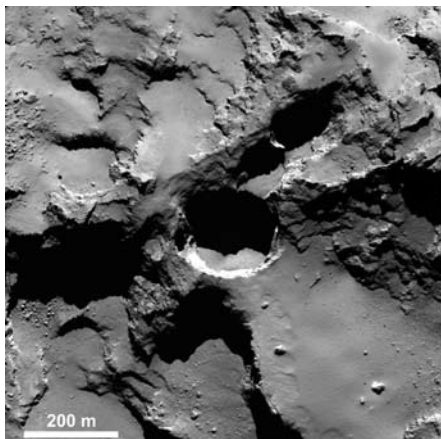
A 67P felszíne és aktivitása

Az üstökös mag felszínének feltérképezése folyamatosan zajlik a Rosetta fedélzeti kameráival. A megérkezést követő első három hónapban 3–7 méteres felbontással készültek a felvételek, de egyes kisebb területekről 15–80 centiméteres felbontású képek is születtek. Mindezek nyomán elkészült a felszín nagy méretskálájú geomorfológiai térképe, amelyen tizenkilenc felszíni egység különböztethető meg. A kutatók már el is neveztek egyes felszínformákat, amihez elsősorban az ókori Egyiptomhoz kötődő valós vagy mitikus személyek, földrajzi helyek neveit használják. A 67P felszíni régiói a geológiai tulajdonságok szerint öt kategóriába sorolhatók. Ezek a következők:



A 67P magján a szabályos kör alakú mélyedések, hengeres lyukak elhelyezkedése, amelyek nagyrészt por áramlik ki, ezek a porjétek egyik lehetséges forrásai. A lyukak legtöbbször az Ash, Ma'at és Seth régiókban található, de kisebb számban a Bastet és Hathor régiók területén is előfordulnak (ESA/Rosetta/MPS OSIRIS)

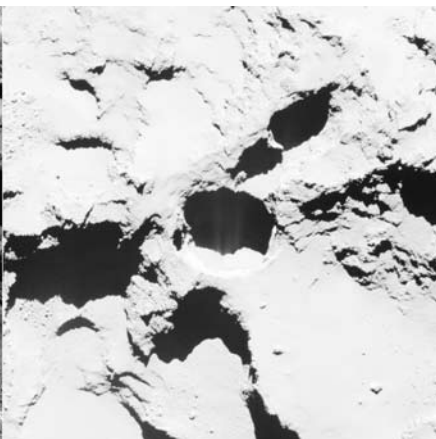
- A: por által borított felföldek;
- B: viszonylag kemény anyagú felszín gödrökkel és kör alakú alakzatokkal;
- C: nagy méretű mélyedések (depressziók);
- D: sima felföldek;
- E: tömör, alulról a felszínre került szabadon álló részek.



Meglepő felfedezés is történt a felszíni részletek tanulmányozása közben. Az eddig ismert volt, hogy a nagyobb porszemcsék nem hagyják el a magot, mert a kiáramló gáz nem képes felfelé mozgatni őket, így ezek a felszínen durva törmelékfaktarókat alkotnak. Új felismerés, hogy a felszínről kiáramló gáz és por képes a felszínnel szinte párhuzamosan áramolni, és mintegy felszíni szél, fodrozza a finom port, illetve akadályokba ütközve szélnyomokat alakít ki.

A felszínen lévő kisebb, néhány métertől akár 100 m-ig terjedő, izolált kiemelkedésekre szép példa az OSIRIS NAC felvétele a Seth régió területéről. Ezek nagy része kigázósodási aktivitást is mutat. Az aktív területek egy másik típusa mélyedések, lyukak formájában mutatkozik. Sokszor szabályos kör peremű és meredek sima falú, hengeres lyukakról van szó, eredetük jelenleg ismeretlen. Ezekből por és gáz áramlik ki.

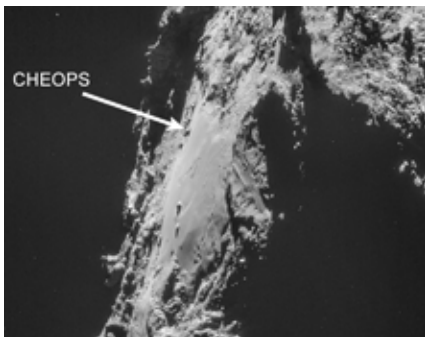
Több helyen repedések, hosszabb-rövidebb barázdák láthatók. Az egyik ilyen árok a mag két összetevőjét elválasztó nyaki részen, a Hapi és Anuket régióban mintegy 500 méter hosszan látható, ami az égítést méretéhez képest jelentős távolság. Az árkok kialakulása ma még nem ismert, de elképzelhető, hogy a mag forgása során fellépő hőingás okozza.



A hengeres aktív lyukak egyike a Seth régió területén a Rosetta OSIRIS NAC kamerájával 2014. augusztus 28-án, 60 km távolságból. Egy képelem 1 méternek felel meg. A jobb oldali kép ugyanaz, csak kontraszt-növelő eljárással kiemelték a lyuk belsejében a sötét árnyékhöz képest fényesebb anyagkiáramlásokat, jéteket (ESA/Rosetta/MPS OSIRIS)

Az is lehet, hogy a két magrész egyszer itt, a nyaki területen fog szétesni és ennek első jele a hosszú repedés. Repedések, árkok az üstökösrag más vidékein is megtalálhatók, ezek közül több szintén aktív terület, gáz és por forrása lehet.

A gáz- és porkibocsátásnak még más forrásvidékei is lehetnek, nevezetesen az aktív sziklafalak, szirtek, amelyek természetesen nem földi geológiai értelemben vett kőzet sziklák, hanem az üstökös poros, jeges anyagából összeállt felszíni formációk. A sziklafalak felső pereme sokszor repedezett, omlásos, a falak oldalában is repedések vannak, ahonnan porjetek törnek elő. Ilyen aktív sziklafalak található például az Ash és Ma'at régiók területén, de az üstökösrag egész felületén szétszórva máshol is. Sokszor a leomló, málló, erodált sziklafalak tövében méteres, tízméteres méretű tömbök vannak, amelyek legtöbbször szintén porjetek kiindulásának forrása.



A 67P magjának nagyobbik összetevőjén feltűnő nagy, viszonylag sima vidéke, az Imhotep régió, de a sima felszínen sok poros-jeges tömb található, köztük a mintegy 45 méteres Cheops (nyíl mutatja). A tömbök legtöbbször kigázosodási és porkibocsátási aktivitás forrása is egyben. A felvétel 2015. január 16-án készült 28,4 km távolságból, és 2,4 méteres alakzatok különböztethetők meg rajta. (ESA/Rosetta/MPS)

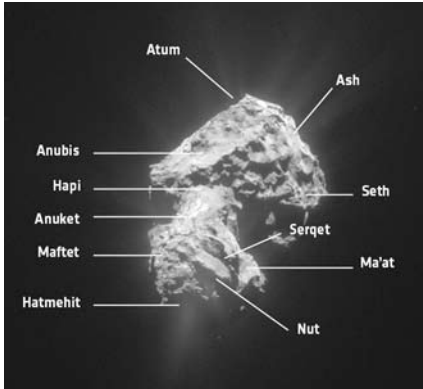
A 67P egy újabb példa arra, hogy egymáshoz képest mennyire eltérőek és sokfélék az üstökösragok, jóllehet mindegyikük a Naprendszer kialakulásának korai szakaszából fennmaradt őseredeti, egyszerű felépítésű égitest. A 67P felszínén megfigyelt réteges szerkezet esetleg a 9P/Tempel-üstökös mag-

jának „csúsztatott palacsintára” emlékeztető rétegeihez lehet hasonló, amely rétegek a kialakuló üstökösragba folyamatosan, de kis sebességgel becsapódó és szétterülő jeges, poros üstökösrag csírák (kometézimálok) lenyomatai. Az is elképzelhető, hogy a kometézimálok laza összeállásából, építőblokkok halmazából épült fel az üstökösrag. Egy másik elmélet szerint az is lehet, hogy a felszíni rétegződést a kigázosodási aktivitással felemelt, de visszahullott nagyobb porzsemcsék által alkotott rétegek okozzák, amelyek helyenként beszakadnak, feltárva a mélyebb, korábban kialakult rétegeket.

Jelen sorok írásakor az üstökösrag felszínének mintegy 70%-át ismerjük, jobbára a mag északi féltékéjét. A következő hónapokban az eddig állandó éjszakában rejtőzködő déli poláris területek is napfényre kerülnek, így továbbra is izgalmas új eredmények várhatók. A perihélium idején a mag déli féltékéjét és déli pólusának környékét fogja megvilágítani a Nap. Mivel a 67P forgástengelye 48° szöget zár be az üstökös pályasíkjával, a perihélium idején a déli pólusvidéken magasan süt majd a Nap, és ott erős szublimációs aktivitás várható. A feltételezett por/gáz tömegarány, és a déli féltéken várható hőmérsékleti viszonyok figyelembe vételével úgy becsülik, hogy a déli féltéke aktív felszíne keringésenként mintegy 20 méteres réteget elveszíti. Ezzel szemben a naptávokban sokkal gyengébben besugárzott északi féltéke legfeljebb 1 méteres réteget veszít.

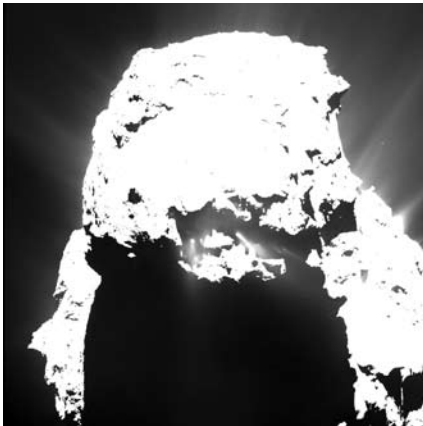
Mivel az üstökösragnak csak bizonyos területei aktívak, mint például a Hapi-Anuket-régiók vidéke, azaz a mag két összetevőjét összekötő befűződés, valamint bizonyos felszíni tömbök, gödrök, mélyedések, ezért a felszíni rétegek csökkenése alapján véve ezekre korlátozódik. Hogy pontosan miként alakul mindez a napközelség környékén, azt majd a Rosetta megfigyeléseiből tudjuk majd meg.

Az űrszonda február 14-én került legközelebb a mag tömegközéppontjához, mintegy 6 km távolságra. Az augusztus 13-i napközelség több hasonló megközelítést terveztek, de sajnos az üstökös egyre növekvő



Az üstökös magjának kisebbik és nagyobbik összetevőjéből is porjetek törnek elő, akár az éjszakai oldalon is. A képen a kisebbik összetevő Hatmehit-medence vidékéről kiinduló jetek is láthatók (ESA/Rosetta/MPS)

vő aktivitása miatt biztonságos, mintegy 100 kilométer távolságban húzódo pályára vezérelték. Érdekes és fontos megfigyelés innen is történt, március 12-én még a 75 km-es távolság ellenére is „tetten érték” egy jet-aktivitás beindulását az Imhotep-régió területén, méghozzá az éjszakai oldalon. Az egyik felvételen még nincs anyagkiáramlás,



A mag kisebbik összetevőjén levő mélyedéséből, a Hatmehit-régió sziklafalai oldaláról és tövéből porjetek indulnak ki akkor is, amikor azon a vidéken már lenyugodott a Nap. A Rosetta NAVCAM 2015. április 25-én a mag tömegközéppontjától 93 km távolságban készített felvétele (ESA/Rosetta/MPS)

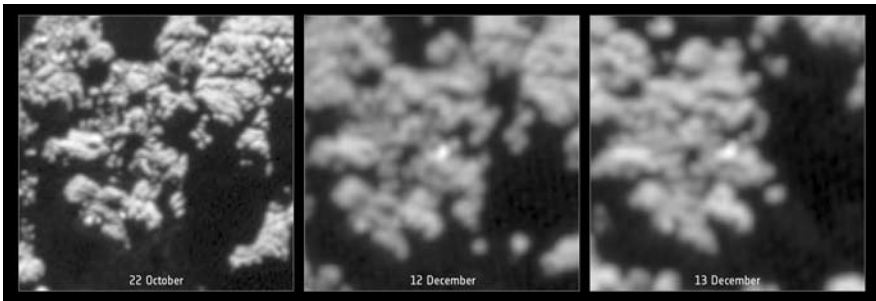
két perccel később viszont V alakban jetek törnek elő a felszínről. A terület azóta is mutat éjszakai aktivitást, ahogy a mag kisebbik összetevőjének nagy méretű mélyedéséből (Hatmehit-régió) is a helyi naplemente után előtörték porjetek, amelyek az oldal alján bemutatott felvételen jól kivehetők. Az üstökös mag éjszakai oldalának gáz- és porkibocsátási aktivitásának megfigyelése az aktivitási mechanizmus további titkait tárhatja fel előttünk.

A Philae megtalálása és feleledése

A Rosetta Philae leszállógysége a 2014. november 12-ei kalandos landolása után 54 órán keresztül sikeresen teljesítette mérési feladatait, kísérleteit az üstökös magon, és minden adatát rendben továbbította a keringőgységen keresztül a Földre. Az eredetileg kijelölt Agilkia elnevezésű leszállóhely megfelelő megvilágítási és terepviszonyaihoz képest a végső leszállóhely merőben új helyzetet teremtett. A tervezett 7 órás napfénytartamhoz képest csak kb. másfél órán keresztül, és meglehetősen kis szögben voltak megvilágítva a Philae napelemei. Az egyik oldalán levők nem is kaphattak napfényt a terep alakzatainak árnyékolása, illetve a leszállógység kissé megdőlt helyzete miatt.

A Philae feleledésének esélye 2015 tavaszán jött el, amikor a leszállóhelyre ismét besütött a Nap. 2015. március 12-től kezdődően, amikor az üstökös már csak 2,1 CSE-s naptávolságban volt, nyolc napon keresztül várták, hogy a Philae akkumulátorai feltöltődjenek és a Rosetta rádiójeleire válaszoljon a leszállógység, de ez sajnos nem történt meg. A leszállómodul műszereinek működéséhez -45 °C hőmérséklet szükséges, úgy tűnik, március közepén még túl hideg volt a Philae feleledéséhez. Május első felében ismét megkísérelték a kapcsolatfelvételt, de ez akkor sem sikerült.

A Philae tavaly novemberi elhallgatása utáni első rádióüzenetét 2015. július 13-án küldte. Ez a rádióüzenet 85 másodpercig tartott és 300 adatcsomagot tartalmazott. Nem sokkal ezután



A Hatmeit-régióból napnyugtakor is porjetek törnek elő, amelyeket jól megmutat a Rosetta NAVCAM 2015. április 25-én 93 km távolságból készített képfelvétele (ESA/Rosetta/MPS)

23:30–23:45 között a Rosettát és a Philae-t irányító munkacsoportok ügyeletes mérnökei megállapították, hogy a leszállóegység bekapcsolódott és telemetria adatokat küldött. Ezek szerint a leszállóegység hőmérséklete -35°C , napelemei révén 24 watt teljesítmény áll rendelkezésre a Philae-nek az energiaellátó rendszerből. A kapcsolatfelvétel előtti néhány napban a Philae memóriájában már több mint 8000 adatcsomagnyi információ gyűlt össze és ezek arra várnak, hogy a leszállóegység ezeket a Földre továbbítsa. A Philae sikeres „felébredése” után az ESA, DLR és CNES szakemberei a leszállóegység programját újra tervezik, valamint a Rosetta pályáját úgy módosítják, hogy a további kapcsolattartáshoz megfelelő rádióablakok biztosítva legyenek.

A 67P láthatósága

Már az 1969-es felfedezését követő napközelségei idején történt megfigyelésekből látható volt, hogy a 67P nagyon poros üstökös, amit a Rosetta helyszíni mérései is megerősítettek. Földi teleszkópok, és földközeli pályán keringő űrteleszkópok (HST, Spitzer) a 67P korábbi napközelsége körüli hónapokban jelentős porkómát, porcsóvát és nagy, több száz mikronos, milliméteres porszemcsékből álló porösvényt mutattak ki. Idén augusztusban, a napközelsége hónapjában lesz jól megfigyelhető az üstökös közepes, vagy annál nagyobb távcsövekkel, várható fényessége 13^m körüli.

A hó elején a Taurus csillagképben jár, majd onnan átkerül a Geminibe, elongációja

43–44 fok között lesz, vagyis napkelte előtt a hajnali égbolton lehet megfigyelni. Az ekliptika közelében halad, augusztus 7-én hajnalban az IC 2157 jelű nyílthalmaz keleti szélén látható, másnap pedig az M35 nyílthalmaz déli pereménél találhatjuk meg. Augusztus 13-án halad át napközelpontján, 1,243 CSE-re, földközlemben augusztus 23-án lesz 1,768 CSE-re. A pirkadat kezdetén mintegy 20 fok magasan álló üstökös megtalálását segítheti, hogy augusztus 20-án hajnalban 13'-cel délre lesz az $5,2^m$ -s ω Gem-től, 24-én pedig 21'-cel északkeletre az $5,9^m$ -s 48 Gem-től. Augusztus 31-én 02:30 UT-kor 45'-cel nyugatra látható a 141P/Machholz-tól, amely ugyanekkor 13'-cel délnyugatra látható a $3,6^m$ -s κ Gem-től.

Szeptemberben megfigyelésre még kedvezőbb helyzetbe kerül a 67P, de halványodni kezd, ahogy a naptávolság egyre nő, így már jobbra csak asztrofotókon rögzíthetjük a Rosetta-program kapcsán híressé vált égi vándort. A korábbi napközelségei idején történt megfigyelések szerint a perihéliuma után még egy hónapig jelentős mértékű gáz- és porkibocsátása lehet, ami ellene hat a naptávolság növekedésének, továbbá a porkibocsátása jól megfigyelhető porcsóvát is fejleszt és tart fenn. Szeptember 6-tól a Cancer, majd szeptember 30-tól a Leo csillagképben folytatja égi útját. Érdemes megjegyezni, hogy a következő, 2021-es napközelsége idején a mostanához képest sokkal kedvezőbb helyzetben lesz látható, ugyanis novemberre esik, így $0,418$ CSE-s közelségben lesz a Földhöz, miközben a Cancer csillagképben fog látszani.

Tóth Imre