

A ROSETTA–PHILAE SIKERE MAGYAROK RÉSZVÉTELÉVEL

Szalai Sándor
Wigner FK

Az Európai Űrügynökség (ESA) június 1–3. között Budapesten rendezte a Rosetta–Philae űstökös-kutató űrmisszió záró konferenciáját. A fejlesztésben részt vevő MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, MTA Energiatudományi Kutatóközpont (EK), Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, valamint az SGF Technológia Fejlesztő Kft. űrkutatói és mérnökei munkájának ez komoly elismerése. Magyarok fejlesztették a leszállóegység két létfonosságú részét: a központi számítógépet és a tápellátó rendszert. A konferencia Európa számos országából érkezett mintegy 80 résztvevővel, sűrű programmal, sok tudományos és technikai jellegű előadással sikeresen lezajlott. A kutatók és a fedélzeti műszerek, valamint szolgálati alrendszerek készítői részletesen beszámoltak a Naprendszer- és űstökös-kutatásban elért új tudományos eredményekről és a technikai-technológiai jellegű sikerekről is. A konferencia a tanulságokat összefoglaló *Lessons learnt* szekciójában elhangzott előadások a tapasztalatok levonásán túl jövőben alkalmazható javaslatokat is ismertettek.

A Rosetta–Philae leszállóegység jelentős sikerét jelzi, hogy a Nemzetközi Asztronautikai Akadémia (IAA) *Laurels for Team Achievement* díját 2016-ban a leszállóegység nagy létszámú „csapata” kapta, amelyvel a nagyszámú kutató és fejlesztőmérnök több éves munkáját ismerték el. Az átadó ünnepséget Bonnban, a német DLR űrügynökség központjában tartották február 23-án, ahol a magyar fejlesztőket *Balázs András* képviselte, aki a Philae leszállóegység hibatűrő központi számítógépének (CDMS) fejlesztését vezette. A díjátadás alkalmából az IAA elnöke, valamint a DLR vezetői méltatták a misszió sikereit. A DLR korábbi vezetője a projekt nemzetközi jellegét aláhúzva beszédében külön megemlítette, hogy a leszállóegység igen bonyolult feladatot ellátó vezérlő szoftverét Magyarországon fejlesztették még azelőtt, hogy az ország az ESA teljes jogú tagja lett volna. A március 15-i nemzeti ünnep alkalmával Magyarország köztársasági elnöke megosztott Széchenyi-díjat adományozott az űrkutatás világtörténetében egyedülálló magyar mérnöki teljesítményért, a leszállóegység műszerei elkészítése során végzett kiemelkedő munkájuk elismeré-

seként *Apáthy Istvánnak*, *Balázs Andrásnak* és *Bánfalvi Antalnak*.

A Rosetta misszió a nevét a rosette-i kőről kapta, amely három nyelven tartalmaz azonos feliratot (egyiptomi démotikus írással, ógörög nyelven és egyiptomi hieroglifákkal). A Philae a Nílus szigete az asszuáni gát fölött, Egyiptomban. A ma Angliában található philae-i obeliszok oldalán szintén hieroglif és démotikus írással egyiptomi és ógörög nyelvű felirat található. A hieroglif írást megfejtő francia *Champollion* a rosette-i kő és a philaei obeliszok feliratait együtt tanulmányozva találta meg a megoldást, mindkét szövegben – hieroglifákkal írva – meglelte *Ptolemaiosz* király és *Kleopátra* királynő nevét. Ezáltal a két lelet a hieroglifák megfejtésének a kulcsa lett. Maga a rosette-i kő 1802 óta a londoni British Museumban található, a Philae szigeti obeliszok pedig szintén Angliában van, felfedezője szállította Kingston Lacy-ba. Az űstökös-kutató misszió a Naprendszer és az élet keletkezésének megfejtéséhez adhat kulcsot, ezért kapták az űrszondák nevüket e két egyiptomi leletről.

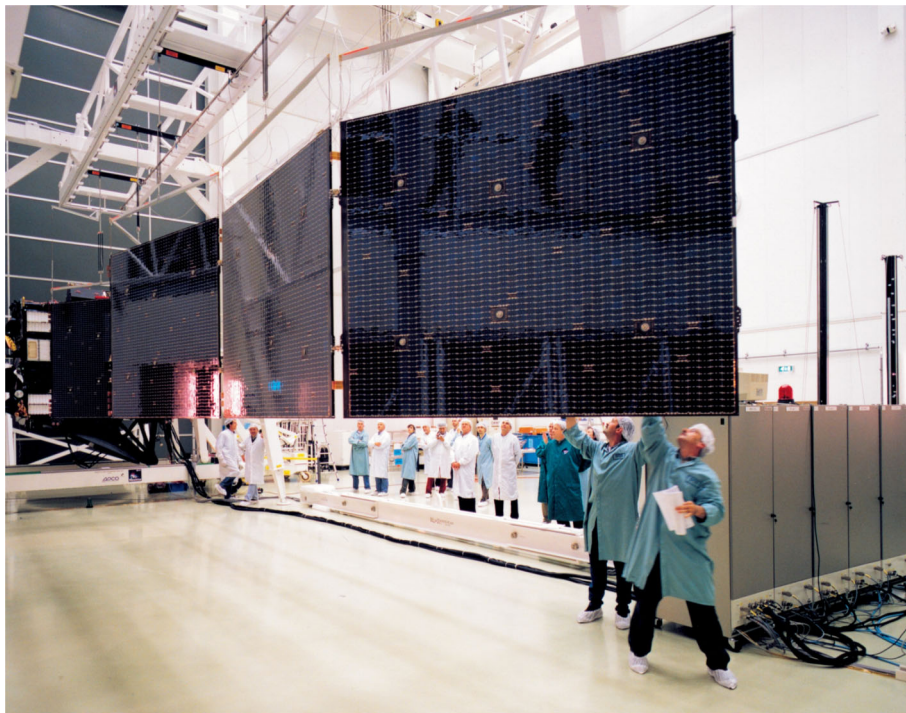
A leszállóegység „agyát”, a működését irányító számítógépet (Command és Data Management System – CDMS) a Wigner FK és az SGF Kft. fejlesztette.

A Rosetta és a Philae szondák összeszerelése az ESA technikai központjában (ESTEC) (forrás ESA).



Szalai Sándor a műszaki tudomány doktora, a Wigner FK kutató professor emeritusa. 1980 óta űrkutatási műszerek fejlesztője, főbb munkái: a Halley-űstökös VEGA szondáinak képfelvevő és követő rendszere, a Phobosz és Mars-96 több műszere, a NASA Szaturnusz kutató Cassini szonda két műszere, az ESA MarsExpress, VénuszExpress és Rosetta szondák több műszere, jelenleg a BepiColombo és JUICE szondák plazmafizikai műszerei. Kitüntetései: Állami Díj (1986), NASA (1998) és ESA oklevél (2004, 2009).





Az egyik 32 m² felületű napelemtábla nyitásának ellenőrzése az ESTEC-ben (forrás ESA).

és a ROMAP műszeregyüttes SPM plazmadetektora.

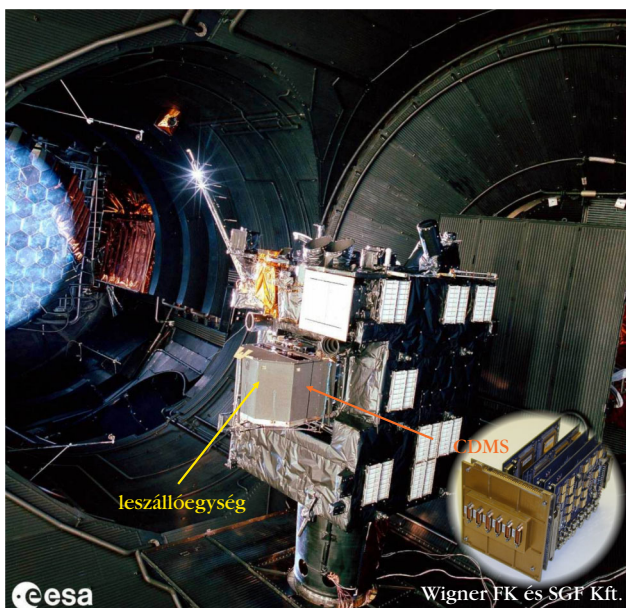
A már összeszerelt szonda 2003. január 11-re tervezett indítását az Ariane hordozórakéta műszaki bizonytalanságai miatt elhalasztották. Emiatt az eredetileg tervezett Wirtanen-üstökös helyett új célpontot kellett keresni. A 67P/Churyumov–Gerasimenko (továbbiakban 67P) üstökösre esett a választás. Az új célpontot a Hubble-űrteleszkóppal alaposan tanulmányozta egy háromtagú kutatócsoport, melynek egyik tagja *Tóth Imre*, az MTA Csillagászati Kutatóintézet munkatársa volt. Az 1969-ben felfedezett 67P üstökös sok tekintetben hasonlít a Wirtanen-üstökösre, egy kicsit nagyobb, magjának átmérője mintegy 4 km, Nap körüli keringési ideje 6,6 év. Az ESA 2004. március 2-án indított űr-

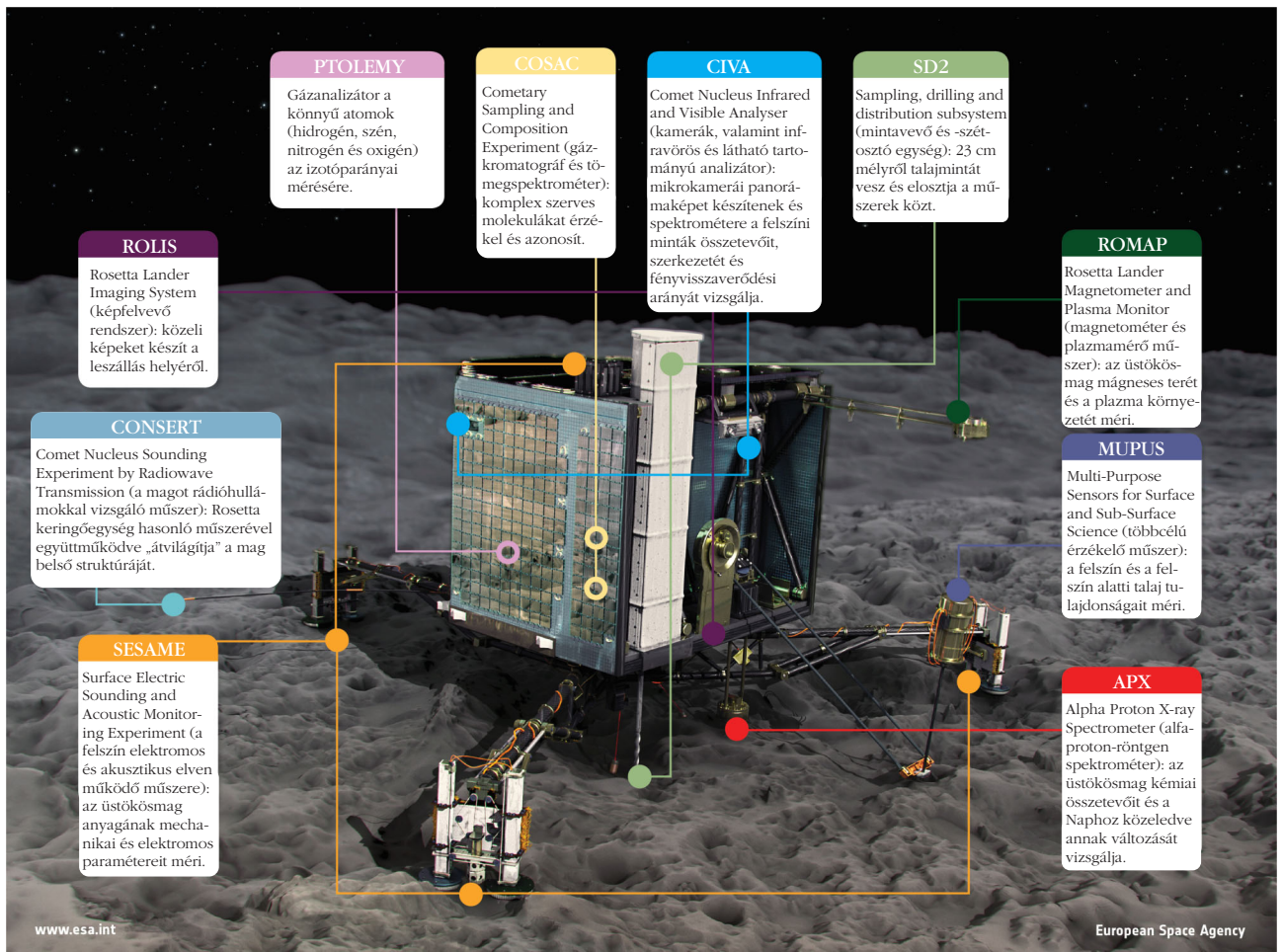
szondapárosa (Rosetta anyaszonda és a Philae leszállóegység) az űrkutatás történetének világraszóló, sikeres programja, mivel most először sikerült hosszú időn keresztül megfigyelni egy üstökös aktivitásának változását a Naphoz közeli pályaszakaszon, valamint elő-

szondapárosa (Rosetta anyaszonda és a Philae leszállóegység) az űrkutatás történetének világraszóló, sikeres programja, mivel most először sikerült hosszú időn keresztül megfigyelni egy üstökös aktivitásának változását a Naphoz közeli pályaszakaszon, valamint elő-

A megbízhatóság tesztelésének egyik eleme: a Philae ellenőrzése vibrációs asztalon (forrás ESA).

A Rosetta és a Philae a Nap-szimulátort tartalmazó hő-vákuumkamrában (ESTEC) (forrás ESA).





A Philae tudományos műszereinek elhelyezkedése, fantáziakép (forrás ESA).

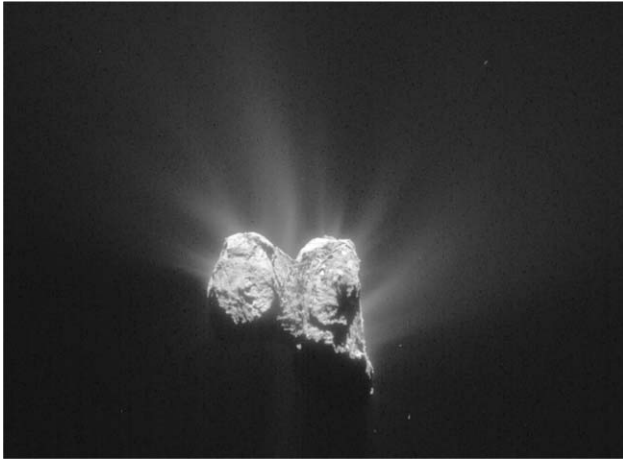
ször sikerült leszállni egy üstökös-mág felszínén, és ott helyszíni méréseket végezni. A korábbi üstökös-kutató űrmissziók vagy elszánguldtak az üstökös mellett, vagy belecsapódtak. A Halley-üstökös 1986-os napközelsége idején hat szonda szánguldt el az üstökös mellett: a Giotto 596 km, a Vega-2 8030 km, a Vega-1 8890 km, a Suisei 150 000 km, a Sakigake 7 millió km, az ICE pedig 30 millió km távolságban. A Giotto és a két Vega szonda csupán alig háromórányi közeli megfigyelést végeztek a retrográd pályájú üstökös magjáról, miközben az üstökös mellett körülbelül 300 ezer km/h sebességgel elszánguldtak.

A Rosetta misszió tervezése 1993-ban kezdődött, a magyar kutatók már az elején részt vettek ebben. Kezdetben két, 45 kg tömegű leszállóegységet terveztek: a NASA és CNES fejlesztésében a Champolliont és a Németországban fejlesztendő Rolandot.

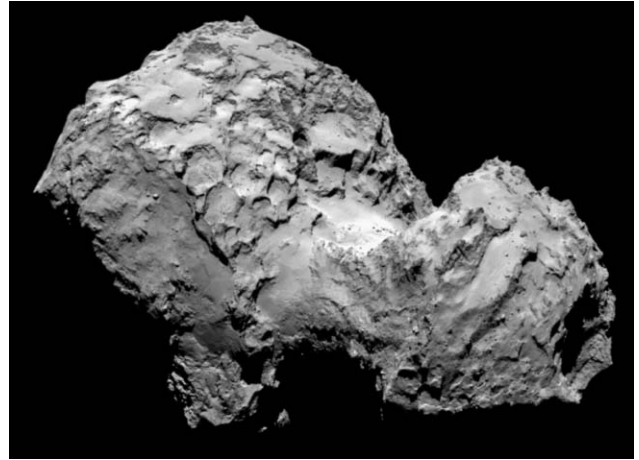
A NASA visszalépése után az ESA vezetése javasolta, hogy csak egy leszállóegység legyen, amely egyesíti a korábbi két változat tudományos céljait. Az új célpont-hoz az átrepülési idő 8 helyett 10 év lett. A várakozás egy éve alatt az űrszonda műszaki felépítésén lényegében nem változtattak, de a szoftverek egy részét át kellett írni, és a két üstökös-tömegének különbözősége miatt a leszállóegység „lábait” is módosították.

Annak érdekében, hogy a szonda az üstökös-tömeg hosszabb időn át közelről megfigyelje, azonos pályára kellett állítani az üstökös-magjáéval. A jelenlegi indító-rakéták energiája nem elegendő ahhoz, hogy a Jupiteren túlra nyúló pályájú 67P üstökös sebességét a Rosetta szonda elérje. Ezért bolygók mellett elrepülve, azok gravitációs lendítő hatását kihasználva lehetett felgyorsítani a Rosetta szondát. A tíz évig tartó repülése során tudományos mérésekre is sor került: 2008. szeptember 5-én a Steins, majd 2010. július 10-én a Lutetia mellett elrepülve a két kisbolygót vizsgálta közelről. 2011. június 20-án hibernálták a Jupiter közeli pályaszakaszán, annak ellenére, hogy 64 m² felületű napelemtáblái vannak, mivel a szolgáltatott energia nem tette lehetővé a műszerek és vezérlő számítógép működését. Csupán időzítő órája működött, és néhány kritikus egység minimális fűtése volt bekapcsolva. A Rosetta 10 éves bolygóközi repülése során 6,4 milliárd km-t repült már, és 673 millió km távolságra volt a Földtől, amikor az előre beprogramozott időben, 2014. január 20-án felébredt. A szonda bekapcsolta szolgálati egységeit, és elküldte első jeleit. Ezután sorozatos földi pályakorrekciós parancsok hatására 2014. augusztus 6-án az üstököshöz közeli pályára állt.

2014. november 14-én, 500 millió km-re a Földtől megkezdődött a küldetés legizgalmasabb szakasza. A



Az üstökös képe 2015. június 1-jén, amikor aktív gáz- és porkilövellések voltak (forrás ESA).



Az üstökös magja a Rosetta mag körüli pályára állásakor, a gáz- és porkilövellések szerencsésen lecsökkentek (forrás ESA).

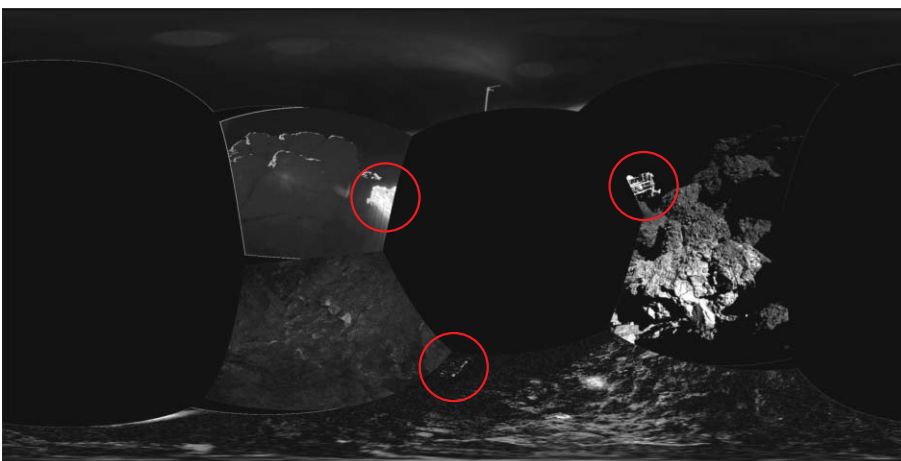
Philae leszállóegység 22,5 km távolságból, 0,17 m/s induló sebességgel, 7 órás ereszkedés után 0,35 m/s sebességgel az üstökös igen tagolt felszínére érkezett. A pályaszámításoknak megfelelően a lábak az előzetesen kiválasztott 250 méter sugarú körben érték el a felszínt. Ám ekkor kezdődtek a problémák, de azok végül nem hiúsították meg a kitűzött fő feladatok végrehajtását. A tökéletes leszállást két berendezés meghibásodása hiúsította meg. A leszállást előkészítő műveletek során kiderült az ADS (Active Descent System) fúvóka meghibásodása, amely közvetlenül a felszínt éréskor a felszínhez szorította volna a leszállóegységet, amíg az Anchoring System (horgonyzó rendszer) a talajba lövi szigonyát, amely a talajhoz rögzítette volna a szondát. A talajt érés pillanatában viszont sem a fő, sem a tartalék szigony nem lépett működésbe, mert a $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérsékleten tett 10 évnyi űrutazás után a pirotechnikai patronok nem lőtték ki a szigonyokat.

A Philae leszállóegység egy teljes értékű fizikai és kémiai laboratórium tíz tudományos műszerrel, amelyek a Rosetta űrszondával összekalibrált egyidejű mérések elvégzésére is alkalmasak. A műszerek a következők: kamerarendszer; α -p-X-sugárzási spektro-

méter; korszerű gázelemző az elemi, molekuláris és izotóp-összetevők érzékeléséhez; infravörös mikroszkóp; felszíni akusztikai és hullámdetektor; permittivitásérzékelő; magyar fejlesztésű porrészecske-érzékelő; többfunkciós felszíni és felszín alatti érzékelő; magnetométer; plazmatér-érzékelő; üstökösmaghullám-érzékelő; fúró, mintavevő és szétosztó berendezés.

A leszálláskor mért szeizmikus adatok vizsgálata azonban kimutatta, hogy a vékony felszíni poros hóréteg alatt annyira kemény jégtömeg található, hogy a szigonyok várhatóan meg sem tudtak volna kapaszkodni. A tervek szerinti leszállóhelyen fordulatoként 6-7 napfényes óra lett volna, viszont a Philae-t – végleges pozíciójában – a 12,4 órás tengelyforgás során csak 1,2 órán át érte napfény. Ez eredményezte, hogy közel 60 órás működés után elfogyott az energia, és a szonda hibernált állapotba került. A Naphoz közeledő üstökös felszínén a hőmérséklet-emelkedés következtében a Philae képes volt 2015. április 25-én életre kelni, és megkezdte a másodlagos tudományos küldetést. Az erősebb napfény több energiát szolgáltatott, és 2015. június 13-án újból rádiókapcsolatot létesített a Rosetta űrszondán keresztül a Földdel. Ezután még további nyolc alkalommal kommunikált,

A Philae CIVA kameráival leszállás közben készített képek összemontírozva. A karikákkal a lábak látható részei vannak jelölve a felszín háttérében (forrás ESA).



újabb tudományos adatokat is küldve. A rádióadók és -vevők állapota folyamatosan romlott, az elsődleges adó meghibásodása után, 2015. július 9-én a Philae már a tartalék adóján küldte el utolsó adatait. A fedélzeti számítógép összességében több tíz megabájtnyi adatot küldött a Földre, és a másodlagos küldetés 2,5 hónapja alatt is hibátlanul működött. A Philae a tudósok számára még így is évekig tartó tudományos elemzésre váró mérési adatokat továbbított teljesen automatikusan.

A konferencián a kutatók többek között beszámoltak a pontos leszállóhely megtalálására tett erőfeszítésekről. Tudományos műszerek (elsősorban a mágnetométer és az üstökösrag átvilágítására kifejlesztett rádióberendezés, amelynek egységei részben a Rosetta keringőegységen, részben a Philae leszállóegységen voltak) mérési adatait elemezve sikerült behatárolni azt a területet, amelyen a végső leszállás megtörtént, ezt a területet a keringőegység kamerájának képeit vizsgálva fésülték át a Philae helyének meghatározása céljából.

Ez utóbbi nagy felbontású közelképek információit szolgáltatnak az üstökösrag keletkezéséről és a felszín formáló folyamatokról is. A simább területeken megfigyelt repedéshálózatok illóanyagvesztésből és termikus anyagfáradásból fakadó aprózódásra utalnak. A durvább felületű szemcsés agglomerátumok méreteloszlásából következtetni lehet az üstökösrag keletkezésének körülményeire, a Naprendszer keletkezésének legelső fázisaira. A felszín tulajdonságaira annak dielektromos állandójának méréséből is következtethetünk. Ilyen mérések alapján állítják a kutatók, hogy az üstökösrag összepréselt porból és jégből áll, amelyet szilárd héj burkol.

Több műszer analizálta a felszín anyagának összetételét is. A jégen kívül komplex, szerves vegyületekben gazdag port sikerült kimutatni, amelynek összetétele jól modellezhető a Földön is megszokott vegyületek keverékeként. Kimutatták, hogy a keverék nem tartalmaz savakat, ként és aromás vegyületeket, viszont az élő anyag egyszerűbb építőkövei nagy valószínűséggel megtalálhatók benne. A leszállás során a por-detektor felső korlátot határozott meg a porfluxusra, továbbá mm-es méretű, rendkívül porózus szerkezetű porszemcséket talált. A leszállóegység és a keringőegység együttműködéséből származnak a mag belső szerkezetére vonatkozó információink. A magot átvilágító rádióberendezés adataiból kitűnik, hogy a mag kis skálán rendkívül porózus, viszont nagyobb üregeket nem tartalmaz. Sikerült pontosítani a jég és por arányára, valamint a por lehetséges összetételére vonatkozó információkat is.

Az eredmények jelentőségét az egyik résztvevő így foglalta össze: „Soha ezelőtt még nem szálltunk le ilyen ősi objektumra, amely a Naprendszer születésének és korai fejlődésének legrégebbi és talán legjobban megőrzött tanúja.”

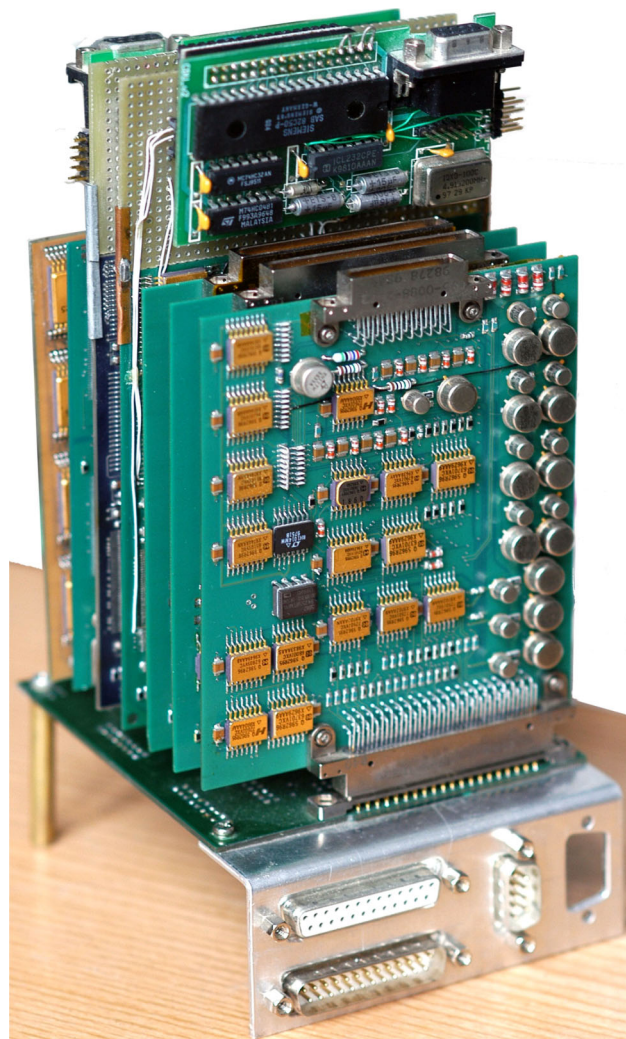
A misszió 2016. szeptember 30-án ért véget, amikor is a Rosetta anyaszondát az üstökös magjára irányították, és közben igen közeli képeket tudtak készíteni és a Földre küldeni.

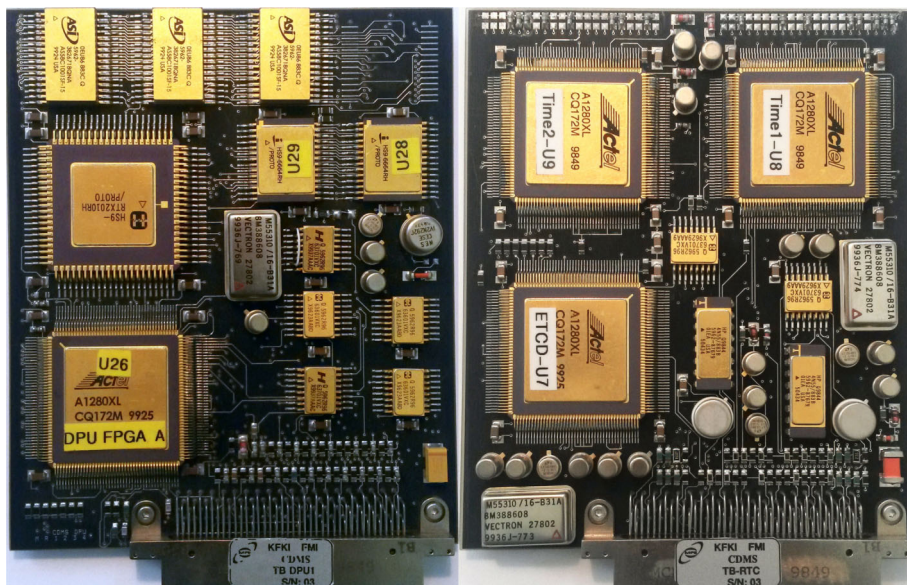
Technikai részletek a központi számítógépről

A Wigner FK és az SGF Kft. által fejlesztett számítógép (CDMS) feladata a leszállóegység összes műveletének irányítása, beleértve a hosszú időtartamú misszió során a hasznos teher (tudományos műszerek, fedélzeti alrendszerek) ellenőrzése, továbbá a megközelítést

követően a leszállóegység és az anyaszonda szétválasztásának előkészítése, a felszínre történő leszállás és felszínhez rögzítés vezérlése, valamint a hőmérséklet-szabályozás megoldása és energiaelosztás vezérlése az üstökösön végzett műveletek során. A Philae a Rosetta közvetítésével veszi a földi irányítás parancsait, és végrehajtja azokat. Gyűjti, majd visszaküldi az alrendszerek és a tudományos műszerek által mért adatokat. A fedélzeti számítógép a leszállóegység egyik legkritikusabb eleme, mivel meghibásodása a küldetés végét jelentette volna. A legfőbb tervezési szempont az volt, hogy a fedélzeti számítógép a funkcionális alrendszerek meghibásodásának bármely kombinációja esetén is funkcióvesztés nélkül tudja ellátni feladatait. Mivel a küldetés során gyors és közvetlen földi beavatkozásra a jelentős jelterjedési idő miatt nincs lehetőség, a számítógépnek autonóm módon kell felismernie, ha egy egység hibásan működik, és azt – egyidejűleg aktiválva a megfelelő tartalék rendszert – ki kell iktatnia. Az aktuális elsődleges processzor (DPU) a pillanatnyi állapotát leíró kritikus

A Philae központi számítógépének szoftverfejlesztői példánya, a kártyákra szerelt kiegészítő rátétek a beágyazott processzor működését kezelő billentyűzet és monitorillesztők, valamint a PROM memóriákat helyettesítő újrairható kis kártyák (saját fotó).





A hibatoleráns számítógép tényleges repülő példányának processzor- és órajelgenerátor-kártyái (saját fotó).

adatait (változók, paraméterek, hivatkozások) – amelyek ahhoz szükségesek, hogy a másodlagos (tartalék) processzor ott tudjon folytatni egy megkezdett folyamatot, ahol az elsődleges befejezte – meghatározott időnként elmenti a másodlagos processzorba. A másodlagos processzor ezeket az adatokat veszi alapul egy esetleges szerepcseré esetén. A DPU megvalósítására a kis fogyasztású, úrminősítésű és sugárzásálló Harris RTX2010 processzort választottuk. Ez a 16 bites processzor a Forth programozási nyelvre optimalizált struktúrájú. A Forth ma már feledésbe merült verem (stack) orientált programozási nyelv. A nyelv két stacket használ, az egyiket az adatok tárolására, a másikat

az utasítás végrehajtáshoz. Az aritmetikai kifejezéseket RPN (Reverse Polish Notation) szintaxissal kell megadni, amelynek lényege, hogy az adatokat a műveleti sorrend szerint a verembe kell írni, a szükséges műveletet meghívva az eredmény az adatverem tetejére kerül. A működtető program tömörítve, négyszeresen került tárolásra az újraírható memóriában (EEPROM), az indítási és öntesztelést végző program csak olvasható memóriából (PROM) fut, és az elsőnek talált hibátlan működtető programot a RAM memóriából futtatja. Az EEPROM és RAM memóriák Hamming kódolású hibavédelemmel vannak ellátva.

A CDMS feladatainak ütemezésére, párhuzamos futtatására saját fejlesztésű, valós idejű, preemptív, többfeladatos operációs rendszerre volt szükség. A földi parancsok számának csökkentésére a leszállóegység műveleteinek irányítása statikus és dinamikus működést leíró paramétertáblák segítségével történt. A táblázatok még a leszállás előtt fel lehetett tölteni, és a körülmények pontosabb ismerete alapján a megfelelő működtető szekvenciát földi paranccsal lehetett indítani.



A Rosetta projektben való részvételünket a Magyar Űrkutatási Iroda támogatta, amelyért ezúton fejezem ki köszönetünket.