

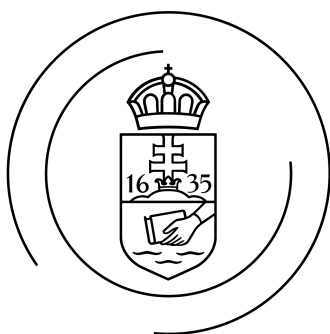
OTDK DOLGOZAT

FIZIKA, FÖLDTUDOMÁNYOK ÉS MATEMATIKA SZEKCIÓ

Meteorrajok videókamerás megfigyelése és innovatív adatfeldolgozás

SZABÓ OLIVÉR NORTON

Csillagász MSc



ELTE

TTK

Témavezetők:

KISS L. LÁSZLÓ

kutatóprofesszor

SÁRNECZKY KRISZTIÁN

kutatásvezető

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizikai és Csillagászati Intézet

2024

Kivonat

A dolgozat a 2022-es Tau Herculidák meteorraj vizsgálatának és az ebből származó adatok innovatív feldolgozásának eredményeit mutatja be. Motivációnk, hogy olyan módszertant dolgozzak ki, mely lehetővé teszi kisebb költségvetésű meteorraj expedíciók véghezvitelét egy-helyszínes megfigyelések elemzésével. A kutatás során a texasi McDonald Obszervatóriumban végzett megfigyelések alapján 626 egyedi tau herculida meteort azonosítottunk. Fotovizuális módszerrel megbecsültük az egyes meteorok fényességét, és meghatároztuk térbeli eloszlásukat. A megfigyelések célja egyrészt a meteorraj aktivitási görbéjének részletes meghatározása volt, másrészt a meteorraj radiáns helyzetének pontosabb meghatározása a meteorpályák főkörökre való illesztésével és hőtérképes vizualizációval. A kutatás során minden vizsgált tulajdonság esetén sikerült megerősíteni a velünk egyszerre, függetlenül dolgozó kutatócsoportok által publikált értékeket, ami mutatja a módszerünk ígéretességét. Eredményeink jelentős hozzájárulást jelentenek a meteorrajok megfigyelésének és elemzésének módszertanához. Jelen dolgozat részletesen bemutatja a megfigyelési és adatfeldolgozási technikákat, az eredmények értékelését, és a meteorrajok kutatásában alkalmazható új módszerek lehetőségeit.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Irodalmi áttekintés	3
2.1. A meteorok megfigyelésének történeti áttekintése	3
2.1.1. A tudományos forradalom hatásai a meteorok kutatására	3
2.1.2. A meteorok vizsgálatának fejlődése a 20. században	4
2.2. A megfigyelési technikák fejlődése	5
2.2.1. Vizuális észlelés	5
2.2.2. Fotografikus megfigyelés	6
2.2.3. Videókamerás adatgyűjtés	7
2.2.4. A közelmúlt technológiai fejlesztései	8
2.3. A Tau Herculidák és a 73P/Schwassmann-Wachmann üstökös	9
2.3.1. A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 felfedezése és korábbi megfigye- lések	9
2.3.2. A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 aprózódása	10
2.3.3. A Tau Herculidák tanulmányozása	11
2.4. Meteorkitörések előrejelzése és modellezése	12
2.4.1. A meteorraj-kitörések előrejelzésének elméleti alapjai	12
2.4.2. Az előrejelzések nehézségei és korlátai	13
3. A 2022-es Tau Herculidák meteorraj kitörésének megfigyelése	14
3.1. Expedíció a McDonald Observatóriumba	14
3.2. Adatgyűjtés	15
3.3. A meteorok katalogizálása	16
3.3.1. A meteorok beazonosítása	16
3.3.2. Nehézségek az azonosításnál	18
3.3.3. Lehetséges jövőbeli változtatások	19
3.4. Adatredukálás	20
3.4.1. Hangfelvételek	20
3.4.2. Videófelvelelek	20
3.4.3. A meteorok koordinátáinak meghatározása	21
3.4.4. Fényességbecslés	22

4. Adatelemzés	24
4.1. Radiánsmeghatározás	24
4.1.1. A párosítás módszere	24
4.1.2. A radiáns meghatározásának hőtésképes módszere	26
4.2. A raj egyéb tulajdonságai	28
4.2.1. A populációs index meghatározása	28
4.2.2. ZHR számítás	29
4.2.3. A kitörés maximuma	31
5. Eredmények	32
5.1. Új módszer meteorrajok elemzésére	32
5.1.1. A hőtésképe előnyei	32
5.1.2. A 2022-es Tau Herculidák radiánsának meghatározása	34
5.2. A 2022-es Tau Herculidák populációs indexének és ZHR-ének meghatározása	34
6. Diszkusszió	35
Mesterséges intelligencia alkalmazása	37
Köszönetnyilvánítás	38
Hivatkozások	39
Függelék: Saját eredmények	49

Ábrák jegyzéke

- 3.1. Május 30-án a McDonald Obszervatórium látogatóközpontja mellett felállított kamerák. A megfigyelésekhez használt három kamera az AllSky7 (középen), a DMK (jobbra) és a Sony $\alpha 7$ (alul). A Hobby-Eberly Teleszkópot (a háttérben) nem használták a Tau Herculidák megfigyelésére. A fotó készítette: RM. 16
- 3.2. Pillanatkép a legfényesebb, -2^m tau herculidáról, amelyet videón rögzítettek. A meteor május 31-én 04:36:07 UTC-kor jelent meg a Corvus csillagképben. Nyomai a videón és a helyszínen távcsővel is több percig láthatóak maradtak. Egy halványabb, $4,5^m$ tau herculida is megjelent a kép jobb oldalán egyidejűleg. 17
- 3.3. A megfigyelt meteorok időbeli eloszlása. A feltételezett maximumot megjelöltem. 6:30 és 7:30 UTC között nem gyűjtöttek adatokat. 18
- 3.4. Három másodperces videószakasz május 31-én 03:02:21 UTC-től kezdődően a Corona Borealis melletti égboltról. Három meteor (két kör) és hat műhold (egy kör) látható. 19
- 3.5. A KLL által május 31-én készített felvétel hullámformája. A 220 tűske mindegyike egy-egy meteort jelent, amely elég fényes ahhoz, hogy a megfigyelők láthassák. 20
- 3.6. A 0531_045504_08h80% „iker meteor” az összeadás előtt (balra) és után (jobbra). A látómező körülbelül 3° 22
- 3.7. Összehasonlító csillagok a Corvus és a Leo csillagképekben. Ezeket a csillagokat referenciapontokként használtuk a meteorok fényességének becsléséhez. 23
- 3.8. Az ábra a meteorok fényességének gyakorisági eloszlását mutatja május 31-én. 24
- 4.1. A meteorpárok metszéspontjai. A pontok szűrésére sigma clipping módszert alkalmaztunk, így két lépésben először a piros, majd a zöld színnel jelölt metszéspontokat elhagytuk. A kék pontok mediánját és szórását vettük a Tau Herculidák látszólagos radiáns pozíciójának és annak bizonytalanságának (lásd a 4.1. táblázatot). 25
- 4.2. A nagy kör, amely a meteorok az égi gömbhöz viszonyított pályájához kapcsolódik. A 4.5. egyenletben szereplő vektorok fel vannak címkézve. . . 27

4.3.	Az ábrázolás egy égtérképet mutat be, ahol főkörök jelölik az egyes meteorokat. A legforróbb területek a Tau Herculidák meteorraj május 31-én megfigyelt radiáns és antiradiáns helyét jelzik. (Lásd a 4.2. táblázatot.) . . .	28
4.4.	A meteorok fényessége kumulatív hisztogramon ábrázolva.	29
4.5.	A grafikon a Tau Herculidák meteorraj 2022. május 31-i ZHR változását ábrázolja. A meteorraj csúcspontja egyértelműen 04:29 UTC-kor figyelhető meg.	31
5.1.	Közelkép a radiánsról a május 31-i tau herculida meteorok felhasználásával készített hőtérképen.	33

Táblázatok jegyzéke

4.1.	A 2022-es Tau Herculidák radiánsának számított koordinátái. Az N a megmaradt meteorok számát adja meg a sigma clipping két lépése után.	26
4.2.	A 2022-es Tau Herculidák radiánsának számított koordinátái a hőtérképes módszerrel.	28
4.3.	A Tau Herculidák ZHR-jének kiszámításához használt értékek a 3.1. egyenlethez és az így kapott ZHR.	31
5.1.	A 2022-es Tau Herculidák meteorraj független kutatócsoportok által előrejelzett és megfigyelt radiánspozícióinak összefoglalása.	34
5.2.	A 2022-es Tau Herculidák meteorraj független kutatócsoportok által számított populációs indexeinek (r) és ZHR értékeinek összefoglalása.	35

1. Bevezetés

A meteorok megfigyelése és tanulmányozása nem újdonság az emberiség számára. Az ókor óta léteznek feljegyzések az égen átvonuló tüzes csíkokról, de eredetük sokáig kérdéses volt (D'Orazio 2007). A 'meteor' szó (Gk. $\mu\epsilon\tau\epsilon\omega\rho\omicron\nu$) azt sugallja, hogy ez a Föld légkörének jelensége. A meteorokat kezdetben a Föld légkörében keletkező gyúlékony gőzök robbanásának gondolták (Hughes 1982). A kozmikus eredet gondolata Edmond Halley javasolta. 1714-ben megjelent tanulmányában az elsők között vetette fel, hogy "it must be some Collection of Matter form'd in the $\mathcal{A}\epsilon$ ther, [...] and that the Earth met with it [...] along in its Orb", azaz "valamilyen anyaggyűjteménynek kell lennie, ami az égben keletkezett, majd a Föld találkozott vele a keringési pályáján", mint a jelenség oka (Halley 1714).

A meteorjelenség akkor következik be, amikor a Föld (vagy bármely más légkörrel rendelkező égitest) légkörébe belépő nagy sebességű égitest (meteoroid) a levegő részecskéivel ütközik, és ionizálja azokat. Ezek a molekulák ezután fotonok formájában kibocsátják az elnyelt energiát (Bronshten 1983). A meteorok fényességét egyrészt a Földhöz viszonyított sebességük, másrészt tömegük és méretük határozza meg (Cep-lecha et al. 1998). A meteoroidok mérete széles skálán mozog, a legkisebbek, amelyek még mindig meteorjelenségeket okoznak, vélhetően 1 g tömegűek (Wetherill 1974) és 1 mm átmérővel rendelkeznek (Cep-lecha et al. 1998), míg a felső határértékek történelmileg meghatározottak. A közelmúlt legjelentősebb meteorjelenségét a 2013-as cseljabinszki meteoroid okozta, amelynek tömege két nagyságrenden belül $1,3 \times 10^7$ kg, mérete pedig becslések szerint $(19,8 \pm 4,6)$ m volt (Popova et al. 2013).

A meteorokat eredetük alapján két kategóriába sorolják, a szórványos és a rajmeteorokra (Dohnanyi 1970). Az egyes meteorrajokat okozó meteoroidok szorosan összefüggő pályán mozognak a Nap körül, és gyakran azonosítható az égitest, ahonnan származnak (Jenniskens 2006). Idővel ezek a meteoroidok a bolygók gravitációs perturbációi (Carusi et al. 1981, 1982), sugárzási hatások és egyéb tényezők miatt eltávolodhatnak eredeti pályájuktól, vagy több különálló áramlásra bomolhatnak. Egy idő után ezek a meteoroidok szórványossá válnak, és diffúz, de nem izotróp háttéráramlást alkotnak (Wiegert et al. 2009).

A szórványos, vagy sporadikus meteoroidok nem köthetők egyetlen égitesthez, és a Földön látható vizuális meteorraj jelentős részét alkotják. A meteoroidok tanulmányozása segíthet megkülönböztetni, hogy az anya égitest kisbolygó vagy üstökös-e. A különböző eredetű meteoroidok eltérő tulajdonságokkal rendelkezhetnek, ami fontos információkkal

szolgálhat a NEO-k természetéről (Olsson-Steel 1986).

Az éves meteorrajok, közismert nevükön hullócsillag rajok, olyan égi események, amelyek során számos meteort figyelhetünk meg, amelyek az égbolt egy adott pontjáról sugároznak. Ezek a meteorrajok minden évben nagyjából ugyanabban az időben fordulnak elő, amikor a Föld áthalad egy üstökös, vagy ritka esetekben egy kisbolygó által hátrahagyott törmelékáramlaton (Jenniskens 1994). Ahogy a Föld áthalad ezen a törmelékcsatornán, a részecskék, amelyek mérete a portól az apró kavicsokig terjed (McIntosh 1989), nagy sebességgel belépnek a Föld légkörébe, elégnak, és meteorokként ismert fényes csíkokat hoznak létre az égbolton.

Ismertebb meteorrajok például az augusztusi Perseidák, mely szülő égitestje a 109P/Swift-Tuttle üstökös és a decemberi Geminidák, amik a (3200) Phaethon kisbolygóhoz köthetőek (Jenniskens 2006). A meteorraj intenzitása évről évre változhat, olyan tényezőktől függően, mint a törmelékmező sűrűsége vagy a Föld hozzá viszonyított helyzete (Jenniskens 1998). Ezen rajok tanulmányozása mellett, hogy lenyűgözi a csillagászokat és az égbolt megfigyelőit, és értékes információkkal szolgál az égitestek összetételéről és viselkedéséről (Lindblad et al. 2003).

A meteorkitörések, vagy meteorzáporok olyan ritka események, amelyek akkor következnek be, amikor a Föld áthalad a porsáv egy szokatlanul sűrű részén, ami rövid idő alatt kivételesen nagyszámú meteor megfigyeléséhez vezet (Jenniskens 1995). Ezek a kitörések néha előre jelezhetők (Vaubaillon et al. 2005a), mint például a 2022-es Tau Herculidák esetében (Rao 2021, Jenniskens 2022b). A kitörések gyakran rövid ideig tartanak, de lenyűgöző látványt nyújtanak.

A kitörések tanulmányozása kulcsfontosságú adatokat szolgáltat a meteorrajok fejlődéséről és az anyatesteket érintő dinamikai folyamatokról, például a fragmentációs vagy dezintegrációs eseményekről (Jenniskens 2008). A meteorkitörések egyedülálló lehetőséget kínálnak arra is, hogy adatokat gyűjtsünk az üstökös nyomvonalában lévő kisebb törmelékekről, amelyek megfigyelése egyébként kihívást jelenthet (Vaubaillon et al. 2005b). A jelenségek megértése segíti a Naprendszer dinamikájának, valamint az üstökösök és aszteroidák keletkezési és szétesési folyamatainak megértését.

A Tau Herculidák a 73P/Schwassmann-Wachmann üstökös, más néven SW3 (Hori et al. 2008) évente jelentkező meteorraja. A raj aktivitása jellemzően kisebb (Jenniskens, Phillips, Morales & Grigsby 2011), de a 2022-ben bekövetkező jelentős kitörés lehetősége miatt igen ismertté vált szakmai körökben. (Jenniskens 2022b). A Tau Herculidák megfigyelései betekintést nyújthatnak a meteorzáporok viselkedésébe és az üstökös törmelék dinamikájába. A Tau Herculidák 2022-es kitörése az SW3 üstökös 1995-ös szétesése miatt

következett be (Lüthen et al. 2001). Az esemény utóhatását a Hubble (Toth et al. 2005, Weaver et al. 2006) és a Spitzer (Vaubailon & Reach 2010, Sitko et al. 2011) űrtávcsövek is megfigyelték, értékes adatokat szolgáltatva a fragmentációs folyamatról.

A szétesés következtében az üstökös pályája mentén megnövekedett a törmelék mennyisége, ami miatt fokozottan aktivitást vártunk a 2022-es Tau Herculidák rajtól. (Rao 2021). A kitörés megfigyelése és elemzése egyedülálló lehetőséget kínál az üstökös szétesésének utóhatásainak és a kapcsolódó meteoraktivitásra gyakorolt hatásának tanulmányozására (Koten et al. 2023). A 2022-es Tau Herculidák kitörés tehát látványos égi esemény volt és kulcsfontosságú adatokat szolgáltatott az üstökösök életciklusának és a meteorrajok fejlődésének megértéséhez (Jenniskens 1998).

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A meteorok megfigyelésének történeti áttekintése

2.1.1. A tudományos forradalom hatásai a meteorok kutatására

A tudományos forradalom, amely magában foglalta a reneszánsz és a felvilágosodás időszakát, a meteorok tanulmányozásában mélyreható változást jelentett a mitológiai értelmezésektől a tudományos megértés felé. Ez az átalakító korszak, amelyet a szellemi kíváncsiság és a módszertani szigor fellendülése jellemezett, számos, a természeti világgal kapcsolatos, régóta fennálló hiedelmet átértékelte. A csillagászok és a természetfilozófusok az empirikus bizonyítékokra és a racionális gondolkodásra új hangsúlyt helyezve szisztematikusan kezdték megfigyelni, rögzíteni és elemezni az égi jelenségeket, köztük a meteorokat is.

A klasszikus ismeretek a reneszánsz idején éledtek újjá, a részletes megfigyelési tanulmányok iránti növekvő érdeklődéssel párosulva (Martin 2011); ez az időszak fokozatosan erodálta az arisztotelészi kozmológiai keretet (Bianchi et al. 2007), amely évszázadokig uralta az intellektuális gondolkodást. A megfigyelők kezdték megkérdőjelezni a meteorok légköri jelenséggént való felfogását, és elkezdtek mérlegelni lehetséges égi eredetüket.

A felvilágosodás tovább gyorsította ezeket a fejleményeket, és a gondolkodók az ész és a tudományos kutatás mellett érveltek, mint a tudás elsődleges forrásai (Hankins 1985). Ebben az időszakban a hulló kövek, azaz a meteoritok a tudományos viták és a közvélemény érdeklődésének középpontjába kerültek (Schaffer 2018). Edmond Halley a newtoni fizika alkalmazása az égitestek pályájára, beleértve a nevét viselő üstökös előrejelzését is (Halley 1705), megkérdőjelezte az uralkodó felfogást, és jelentősen előmozdította a meteo-

rok (Halley 1714) és égi eredetük tudományos megértését a felvilágosodás idején (Hughes 1982).

Kezdetben sok tudós szkeptikusan fogadta az égből hulló kövekről szóló beszámolókat, fantáziadús meséknek vagy félreértelmezéseknek minősítve azokat, és időnként nevetséges-sé tette azokat, akik hittek bennük (Pringle 1759). Ahogy azonban egyre több dokumentált hullás gyűlt össze, a tudományos közösség kezdte elismerni a meteorok és meteoritok valóságát. Ez a változás nem egyszerűen az új tények elfogadása volt, hanem egy összetett folyamat, amelynek során heves viták folytak a tanúk hitelességéről, a bizonyítékok megbízhatóságáról és a legitim tudományos kutatás határainról. Az olyan tudósok, mint Georg Lichtenberg és Ernst Chladni (Burke 1991) kulcsszerepet játszottak a meteorok kozmikus eredetének (Chladni 1797) képviselésében, megkérdőjelezve az uralkodó magyarázatokat és feszegetve az ismert természetfilozófia határait.

2.1.2. A meteorok vizsgálatának fejlődése a 20. században

A huszadik század elején a meteorok tanulmányozása a fényképészeti (Whipple 1938) és spektroszkópiai technikák (Millman 1980) fejlődésének köszönhetően szisztematikusabb és tudományosabb irányt vett. A kutatók egyre részletesebb és pontosabb megfigyeléseket kezdtek végezni, és a pusztán vizuális észleléseken túl a meteorok fizikai és kémiai tulajdonságainak megragadására is törekedtek (Ceplecha et al. 1998).

A meteorobszervatóriumok és hálózatok létrehozása lehetővé tette nagy mennyiségű adat gyűjtését, ami elősegítette a meteorok útvonalának, eredetének és gyakoriságának mélyebb megértését. Olyan neves személyiségek, mint Fritz Zwicky, mesterséges meteorokkal végzett kísérleteket javasoltak (Zwicky 1946). Kisebbszámú hasznos terhet akartak ledobni egy módosított V-2 rakétából. Az 1946. december 16-i első indítás sikertelensége után azonban (Zwicky 1947) további kísérletekre nem került sor. Az ötletet elvetették, miután rájöttek, hogy a mesterséges meteorok nem érik el a természetes társaik sebességét, és másképp viselkednek a felső légkörben (Zwicky 1953).

A század előrehaladtával a radar, majd később a számítógépes technológia megjelenése forradalmasította a meteorok kutatását. A radar használata a 20. század közepén lehetővé tette a meteorok vizuális vagy fotografikus hatótávolságon túli észlelését, információt szolgáltatva a felső légkör meteorkörnyezetéről (Hey & Stewart 1947). A század második felében jelent meg a digitális képfeldolgozás (Molau 1994) és az automatizált észlelőrendszerek (Molau 2001), amelyek példátlan adatgyűjtést és elemzést tettek lehetővé.

Ezek a technológiai fejlesztések megnövelték a meteoradatok mennyiségét és minőségét, lehetővé téve a hivatásos csillagászok és amatőr rajongók számára, hogy tovább

bővítsék a meteorokkal kapcsolatos ismereteiket.

2.2. A megfigyelési technikák fejlődése

2.2.1. Vizuális észlelés

A meteorok vizuális megfigyelése több száz éves múltra tekint vissza, és döntő szerepet játszott az égi eseményekről alkotott ismereteink kialakításában (Hughes 1982). A történelem során a megfigyelők az ókori csillagászoktól a reneszánsz tudósokig aprólékosan dokumentálták a meteorok megjelenését, és ezzel nagyban hozzájárultak a későbbi kutatáshoz.

A meteorok vizuális megfigyelése az éjszakai égbolt szisztematikus megfigyelésével és a meteorjelenségek előfordulásának és jellemzőinek rögzítésével történik (Campbell-Brown 2004). A megfigyelők általában sötét, a város fényeitől távoli helyet választanak, hogy a fényszennyezést minimalizálják és a láthatóságot maximalizálják. Ezután hátradőlnek vagy egy fekvőszéket használnak, hogy kényelmesen megfigyelhessék az égbolt széles területét hosszabb ideig, gyakran az előre jelzett meteorzápork idején, amikor a legnagyobb az aktivitás (Jenniskens 1994).

Egy csillagtérkép vagy alkalmazás segítségével azonosítják és feljegyzik az egyes meteorok időpontját, fényességét, színét, sebességét és nyomvonalát. A megfigyelők feljegyzik a meteor látszólagos radiánsát is, az égbolt azon pontját, ahonnan a meteorok látszólag kiindulnak (Jenniskens 2017). A következetesség és az adatok összehasonlításának megkönnyítése érdekében a megfigyelők szabványosított módszereket használnak a fényesség becslésére és megfigyeléseik rögzítésére, ezzel segítve a nagyobb közösségi tudományos projekteket vagy csillagászati társaságokat (Roggemans 1988, Richter 1999).

Viszonylagos egyszerűsége ellenére a vizuális meteormegfigyelésekhez türelemre, a részletekre való odafigyelésre és tiszta, sötét égboltra van szükség, hogy eredményesek legyenek.

A meteorok magasságának első mérése, amely alapvető lépés volt a meteorok valódi természetének megértésében, vizuális megfigyeléssel történt. 1798-ban Brandes és Benzenberg, a Göttingeni Egyetem hallgatói két helyről egyidejűleg végeztek megfigyeléseket (Hughes 1982), ami annak felismeréséhez vezetett, hogy a meteorok sokkal magasabban helyezkednek el a légkörben, mint azt korábban gondolták (Czegka 2000). Ez a felfedezés jelentősen megváltoztatta a meteorok megítélését.

A konkrét történelmi megfigyelések tovább illusztrálják a vizuális technikák hasznosságát a meteorok tanulmányozásában. Az 1833-as Leonidák meteorvihara a legjobb példa

erre, amikor a megfigyelők, mint például Thomson professzor Nashville-ből és mások szer-
te a világon megdöbbenek a meteorok pusztaságától és fényességétől, és a látványt
hóviharhoz hasonlították (Hughes 1982). Ezek a megfigyelések mennyiségi adatokat és
minőségi leírásokat szolgáltatottak, amelyek segítettek a korai tudósoknak megérteni a me-
teorok viselkedését és jellemzőit.

Von Humboldt 1799-ben végzett megfigyelései hasonlóképpen hangsúlyozták a mete-
orok irányított jellegét, mivel az égbolton egy radiánspontra jelölték ki, ahonnan a meteorok
látszólag kiindulnak (Gyssens 2000), ami a meteorkutatás későbbi fejlődése szempontjából
kulcsfontosságú fogalom.

Az első vizuális technikáknak azonban megvoltak a maguk korlátai. Az emberi észlelés,
a környezeti feltételek és a szabványosított mérőeszközök hiánya természetesen korlá-
tozza a megfigyelések pontosságát. E kihívások ellenére a korai megfigyelők által a vizuális
technikák segítségével végzett alapozó munka megalapozta a későbbi fejlesztéseket.

A vizuális technikák a mai napig szerves részét képezik a meteorok tudományának.
A tapasztalt megfigyelők meg tudják mérni a meteorok fényességét és szögsebességét,
valamint fel tudják rajzolni a meteorok útját. A megfigyelők hatékonyságát és határértékét
feltételezve kiszámítható a populációs index és az óránkénti sebesség (Koschack & Rendtel
1990a). Az ismert (vagy mért) radiáns pozícióval minden egyes meteorra jara kiszámítható
a Zenital Hourly Rate (ZHR) (Jenniskens 1994) (Belkovich & Ishmukhametova 1997).

2.2.2. Fotografikus megfigyelés

A fényképezés bevezetése a meteormegfigyelésekbe (Cepplecha et al. 1998) jelentős ug-
rást jelentett ezen égi jelenségek tanulmányozásában, mivel pontosabb és állandóbb felvé-
teleket tett lehetővé. Fred Whipple és mások úttörő erőfeszítései a 20. század elején forra-
dalmasították a meteorok tanulmányozását. Whipple kifejezetten meteorfotózásra terve-
zett Super-Schmidt kamerái (Whipple 1938) számtalan meteorcsíkot rögzítettek, amelyek
bonyolult részleteket tárnak fel az útvonalukról (Whipple 1940a), sebességükről és erede-
tükéről (Whipple 1940b).

A fényképezési módszerek által lehetővé tett egyik legjelentősebb előrelépés az volt,
hogy a meteorok nyomvonalát és ennek segítségével korábbi Nap körüli pályáját pontosan
ki lehetett számítani. A klasszikus vagy kis kamerás fényképezési megfigyelések érzékeny-
sége a $0^M - +2^M$ fényerősségek között van. Ezt a tartományt az 1950-es években $+3^M$ -ra
bővítették (Campbell-Brown 2004).

1965-ben Luigi G. Jacchia, Franco Verniani és Robert E. Briggs átfogó vizsgálatot vég-
zett Super-Schmidt kamerák segítségével, amelynek eredményeképpen 413 meteor nyom-

vonalaának pontos mérését végezték el (Jacchia et al. 1965). Ez az aprólékos munka, amelyet a publikációjukban részletesen ismertettek, példátlan betekintést nyújtott a meteorok légköri pályáiba, lassulásába és fizikai jellemzőibe. Elemzésük rávilágított a fragmentáció fontosságára a megfigyelt meteorok viselkedése és a klasszikus meteorelmélet közötti eltérések megértésében.

Ezek a fényképezési módszerek javították a megfigyelések pontosságát, és új meteoráramlatok felfedezéséhez (Jenniskens, Nénon, Gural, Albers, Haberman, Johnson, Morales, Grigsby, Samuels & Johannink 2016) és a meglévők finomításához (Jenniskens, Nénon, Albers, Gural, Haberman, Holman, Morales, Grigsby, Samuels & Johannink 2016) vezettek. Lehetővé tették a csillagászok számára, hogy pontosan meghatározzák a meteorrajok radiánsát, megmérjék a meteorok égési magasságát a légkörben, és minden eddiginél pontosabban kiszámítsák a sebességüket.

2.2.3. Videókamerás adatgyűjtés

A video- és digitális technológiák bevezetése a meteormegfigyelésekben (Spalding & Hemenway 1961) új korszakot jelentett a területen, javítva az adatgyűjtés pontosságát és mennyiségét. A videóberendezések, különösen a képalkotó technológiákkal felerősítve, lehetővé tették a csillagászok számára, hogy a meteornyomok finomabb részleteit nagyobb érzékenységgel és hosszabb időn keresztül rögzítsék.

A 20. század közepén az olyan úttörők, mint Hawkes (Hawkes et al. 2001) és mások erőfeszítései megalapozták a videós meteormegfigyeléseket. Ezek a módszerek azonban a század második felében nyertek jelentős lendületet. A képerősítő videokamerák kifejlesztése forradalmasította a meteormegfigyeléseket, amint azt Campbell-Brown 2000-es tanulmánya az 1998-as Leonidák záporáról részletesen bemutatja (Campbell et al. 2000). Ez a tanulmány rávilágított arra, hogy a videóberendezések miként rögzíthetik a meteorrajok finom vonásait, információt szolgáltatva a meteorok légköri kölcsönhatásairól és fizikai jellemzőiről.

Az 1990-es években az egyállomásos megfigyeléseket is újra megvizsgálták a videós megfigyelési technikával (Molau & Arlt 1997). Olyan rendszereket hoztak létre, mint a Meteor Observation with Video Equipment (MOVIE) (Molau 1994), és matematikai (Duffy et al. 1987) és szoftvereszközöket fejlesztettek ki a meteorrajok részletes elemzésére (Molau 1995).

A századfordulóra további előrelépés történt az automatizált videohálózatok bevezetésével, mint például a német Arbeitskreis Meteore (AKM) videó meteorhálózat (Molau 2001) vagy a globális CAMPS hálózat (Jenniskens, Gural, Dynneson, Grigsby, Newman,

Borden, Koop & Holman 2011). Ezek a rendszerek automatizált, képerősített videokamerákat és kifinomult észlelőszoftvereket, például a MetRec (Molau 1999) programot használták a meteoradatok minimális emberi beavatkozással történő rögzítésére és elemzésére. A meteorkamerahálózatok az elmúlt két évtizedben több százezer meteort rögzítettek (Jenniskens 2017), adatokat szolgáltatva a világ minden tájáról (Jenniskens et al. 2018).

2.2.4. A közelmúlt technológiai fejlesztései

A Global Meteor Network(GMN) jelentős előrelépést jelent a meteormegfigyelési technológiában. A rendkívül érzékeny és olcsó CMOS videokamerák és a Raspberry Pi számítógépeken futó, nyílt forráskódú meteorérzékelő szoftverek segítségével a GMN drámaian megnövelte a meteorok megfigyelésének hozzáférhetőségét és hatékonyságát. A hálózat 2018. decemberi indulása óta több mint 220 000 pontos meteornyomot gyűjtött össze. Elsődleges céljai közé tartozik a meteorrajok és kitörések részletes, hosszú távú jellemzése, a megfigyelt meteorhullások számának növelése, valamint az adatcsökkentési módszerek átláthatóságának javítása. A GMN által bevezetett új asztrometriai kalibrációs módszer lehetővé teszi a gyakori újrakalibrálást, így biztosítva az adatgyűjtés nagy pontosságát (Vida et al. 2021).

A gépi tanulás (ML) legújabb fejlesztései hatékony eszközöket biztosítottak a meteorészlelés pontosságának és hatékonyságának javítására, különösen az egyállomásos rendszerekben (Anghel et al. 2023). Egy 15 ML-modellt vizsgáló tanulmány célja az egyállomásos meteormegfigyelések újraelemzése volt a téves pozitívumok kiszűrése és a valódi meteorok pontos azonosítása érdekében. Az eredmények lenyűgözőek voltak, a legjobban teljesítő modellek 98,2%-os pontosságot és 96%-os visszahívási eredményt értek el. A tér-időbeli egybeesések felismerésével kombinálva a visszahívási arány 99%-ra emelkedett. Ez a megközelítés megkönnyíti a meteorok ellenőrzésének kézi terhét, és jelentősen csökkenti a felhasználó elfoglaltságát és az eseményhitelesítés hibáit. Az ML alkalmazása a meteorok észlelésében jól példázza, hogy a fejlett számítási technikák hogyan javíthatják a tudományos megfigyeléseket és az adatelemzést.

A Fast Meteor Detection Toolbox (FMDT) (Kandeean et al. 2022) úttörő eszköz a meteormegfigyelésben. Az FMDT fejlett számítógépes látási technikákat használ a Föld légkörébe belépő meteoroidok és űrszemét észlelésére és jellemzésére, és a földi rendszerekhez képest jobb megfigyelési feltételeket biztosít. Az FMDT valós idejű korlátok között működik, és a szürkeárnyaltos videó bemeneti adatokat feldolgozva egy részletes elemzési folyamat segítségével pontos meteornyomokat ad ki. Ez a futószalag magában foglalja az intenzitás hiszterézis küszöbértékének meghatározását, az összefüggő komponensek cím-

kézését és elemzését, valamint a morfológiai küszöbérték meghatározását, amely a darabonkénti követésben csúcsosodik ki, amely finomítja az észlelt meteorok kezdeti listáját. E robusztus számítási megközelítéssel az FMDT javítja a meteorok észlelésének pontosságát és hatékonyságát, és hozzájárul az asztrometriai tudományok fejlődéséhez.

Az olyan mobil megfigyelőállomások, mint a Mobile Observation of METeor (MoMET) eszköz kifejlesztése a mobil meteormegfigyelési technológia innovatív fejlődésének bizonyítéka (Vaubailon et al. 2022). A meteorzáporok, azaz meteorrajok kitöréseinek megfigyelésére tervezett MoMET-berendezés két bőröndből áll, amelyek mindegyikében öt kamera található, amelyeket mini PC-k (Raspberry Pi vagy Odroid) vezérelnek, amelyeken az RMS szoftver fut (Vida et al. 2016). Ez a hordozható rendszer megkönnyíti a kétállomásos megfigyeléseket, és maximalizálja a tudományos eredményeket a meteorzáporok során. A MoMET eszközt különböző kampányokban sikeresen használták meteorzáporok rögzítésére, rugalmasságot, gyors telepíthetőséget és értékes tudományos adatok rögzítésének lehetőségét kínálva szinte bármilyen helyről.

2.3. A Tau Herculidák és a 73P/Schwassmann-Wachmann üstökös

2.3.1. A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 felfedezése és korábbi megfigyelések

A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 (SW3) néven ismert üstökös felfedezésének és megfigyelésének lenyűgöző története szorosan összefonódik meteorrajával. Az 1930-ban a Hamburg-Bergedorfi Obszervatóriumban felfedezett, tipikus Jupiter-csoportba tartozó (Levison 1996) üstökös, amelynek keringési ideje körülbelül 5,3 év, perihélium-távolsága pedig közel 1 CSE, azonnal a meteortevékenység potenciális forrásaként mutatkozott be (Southworth & Hawkins 1963). Érdekes, hogy 1930. június 9-10. körül meteorkitörésről számoltak be, amely valószínűleg ezzel az üstökössel állt kapcsolatban, és amely az SW3 és a Föld légköre közötti egyik legkorábbi megfigyelt kölcsönhatást jelzi (Lüthen et al. 2001).

Az üstökös kutatására visszamenőleg is lehetőség nyílt, amikor elkezdtek az 1890-ig visszanyúló különböző perihélium-átvonulások során keletkezett porsávjainak fejlődését tanulmányozni. E porsávok Földhöz közeli közeledését 1936-ban és 1984-ben azonosították, valamint 2001-re, 2006-ra (Wiegert et al. 2005), 2011-re és 2017-re (Lüthen et al. 2001), és egy különösen figyelemre méltó közeledést jósoltak az 1995-ös porsáv számára 2022-re (Lüthen et al. 2001, Wiegert et al. 2005, Rao 2021, Jenniskens 2022*b*). A találkozások ellenére a 2022-es kitörésig nem jelentettek nagyobb meteoraktivitást, csak kisebb éves háttéraktivitást, 1 és 3 közötti ZHR-ekkel (Jenniskens, Phillips, Morales & Grigsby 2011).

Az üstökös megfigyelési történetében fordulópontot jelentett az 1995-ös visszatérése, amikor hatalmas kitörésen ment keresztül (Crovisier et al. 1995), amely fényességét körülbelül 5,5 magnitúdóra növelte, és a szabad szemmel való láthatóság határára hozta (Crovisier et al. 1996). Ez az esemény vezetett a hosszúkás kómán belül négy különböző fragmentum felfedezéséhez (Wiegert et al. 2005), amelyek a fő objektumot követő önálló kis üstökösként viselkedtek.

Néhány töredék, mint például a B és C töredék, a későbbi visszatérések során is sikertelenül megfigyelni (Boehnhardt et al. 2002, Villanueva et al. 2006). Ezek a fragmentációs események alapvetően befolyásolták az üstökös szerkezetét és viselkedését, valamint a meteorrajok keletkezését és dinamikáját. A periodikus üstökös felbomlási eseményeinek tanulmányozásának lehetősége adta az ötletet, hogy az SW3 legyen az ESA Rosetta küldetésének elsődleges célpontja. Bár végül a 67P/Churyumov-Gerasimenko lett a küldetés elsődleges célpontja, a 73P/Schwassmann-Wachmann 3 továbbra is lehetséges tartalék opció maradt (Boehnhardt et al. 1996).

2.3.2. A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 aprózódása

A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 üstökös széttöredezése kulcsfontosságú esemény az üstökösök dinamikájának megértésében és a meteorok aktivitására gyakorolt hatásában. A különböző megfigyelésekkel széles körben dokumentált, legjelentősebb fragmentáció az 1995-ös perihélium áthaladása során következett be, ami az üstökös történetében (Lüthen et al. 2001) jelentős pillanatot jelentett.

A „73P/Schwassmann-Wachmann 3 - One Orbit After Break-Up: Search for Fragments” (Boehnhardt et al. 2002), a szétválás után azonosított legjelentősebb fragmentumok a B és a C fragmentumok voltak. A C fragmentumot 1999 novemberétől 4 CSE-n befelé tartó kómával figyelték meg legalább 2001 decemberéig 3,3 CSE-n kifelé tartó kómával, ami folyamatos aktivitásra utal egy jelentős időszakon keresztül. Hasonlóképpen, a B töredék 2001 júliusától szeptemberéig kómát mutatott, miközben 2,35 és 2,75 CSE között kifelé haladt. A C töredéktől kezdődően egy 15 x 4 ívperces területen belül további töredékek, köztük az A, D és E töredékek keresése sikertelen volt, ami azt jelzi, hogy a B-n és C-n túli potenciális töredékek vagy túl kicsik, vagy túl halványak ahhoz, hogy a megadott megfigyelési határértékeken belül észlelni lehessen őket.

A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 megfigyelt fragmentációja és az azt követő viselkedése felbecsülhetetlen értékű adatokat szolgáltatott az üstökösök felbomlásának és a kapcsolódó meteorrajokra gyakorolt hatásainak megértéséhez. Boehnhardt et al. (1996) tanulmányában, amely a La Silla teleszkópok megfigyeléseit dokumentálja, az SW3 rend-

szeres megfigyeléseit írja le, az ESA-nak az üstökös iránt a Rosetta-misszióhoz való érdeklődésének részeként. Részletesen bemutatta az üstökös 1995 decemberében történt felbomlásának észlelését, amelynek során összesen négy darabot figyeltek meg a kómában, és megvitatta a felbomlási folyamat különböző forgatókönyveit, beleértve a felszíni kéreg felbomlását a nyomás alatt lévő gáz miatt, valamint a mag felpörgését a gázok kiáramlása miatt.

Az 1995-ös fragmentációs esemény felkeltette az érdeklődést annak kiderítése iránt, hogy a 73P/Schwassmann-Wachmann 3 a múltban produkált-e nagyobb meteorzáporokat. Azonban nem jegyezték fel említésre méltó aktivitást egészen a 2001-es (Lüthen et al. 2001) tanulmányig, amely az üstökös pornyomainak alakulását vizsgálta az 1890-es perihélium-átvonulásig visszamenőleg. A tanulmány hangsúlyozta, hogy a történelmi háttéraktivitás ellenére a tanulmány megírásáig nem számoltak be határozottan SW3 meateorkitörésről. Részletesen beszámolt az 1995-ös szétesésről, többek között négy különálló fragmentumot fedezett fel a hosszúkás kómán belül, amelyeket a fő objektumot követő önálló kis üstökösként figyeltek meg. A mai napig az SW3 egyetlen említésre méltó meteoraktivitása a 2022-es Tau Herculidák kitörés (Jenniskens 2022b).

A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 fragmentálódásának a Tau Herculidák meteorrajra gyakorolt hatása jelentős érdeklődés tárgyát képezi. Egy 2005-ös tanulmány (Wiegert et al. 2005) kiemelte, hogy az SW3-hoz kapcsolódó Tau Herculidák meteorraj 1930 óta nem mutatott jelentős aktivitást. Az SW3 1995-ös fragmentálódása azonban felvetette egy kitörés lehetőségét. A tanulmány nem talált bizonyítékot a Tau Herculidák zápor 2006-os fokozott aktivitására, de 2022-re és 2049-re kimutatható aktivitást jósolt, figyelembe véve az anyaüstökös dinamikáját, valamint a hasadási esemény helyét és idejét.

Emellett a 73P/Schwassmann-Wachmann 3 töredékeinek 2006-os infravörös megfigyelései a C töredékben bizonyos illékony anyagok jelentős csökkenését mutatták ki, ami arra utal, hogy a megfigyelt fogyatkozásnak következményei lehetnek, és arra utal, hogy az SW3 a kémiaiilag legprimitívebb, részletesen vizsgált objektumok közé tartozik (Villanueva et al. 2006, DiSanti et al. 2007, Sitko et al. 2011).

2.3.3. A Tau Herculidák tanulmányozása

A Tau Herculidák meteorraj, amely a 73P/Schwassmann-Wachmann 3 (Jenniskens 2006) üstökös darabjaihoz kapcsolódik, vizsgálat tárgyát képezi, hogy megértsük kiszámíthatatlan természetét. A 2022-ben végzett részletes numerikus szimulációk és megfigyelési adatok mélyreható ismereteket nyújtottak a zápor viselkedéséről és fizikai jellemzőiről (Egal et al. 2023).

Több kutatócsoport elemezte a 2022-es kitörést, gyakran egymásnak ellentmondó eredményekkel. A legtöbbjük azonban egyetért abban, hogy a zápor kettős csúcsot produkált, 20 és 50 körüli ZHR-rel (Jenniskens 2022a, Ogawa & Sugimoto 2022, Vida & Segon 2022, Weiland 2022, Ye & Vaubailon 2022, Kotten et al. 2023, Rendtel & Arlt 2022, Miskotte 2022).

A populációindex-változások és a meteorok magnitúdótartománya azt mutatta, hogy a Tau Herculidák meglehetősen nagy szemcsékből állt (Rendtel & Arlt 2022), ami atipikus jellemző más meteorzáporokhoz képest (Dohnanyi 1970). A megfigyelt meteorfluxus figyelemre méltóan magas volt, ami sűrű meteorrajra utal (Rendtel & Arlt 2022). Rendtel és Arlt tanulmánya rávilágított a zenitvonzásnak a megfigyelt arányokra gyakorolt hatására is, amely korrekcióra a Földnek a meteoroidok pályájára gyakorolt gravitációs hatása miatt van szükség, mielőtt azok meteorként válnak láthatóvá a légkörben. Ezek a részletes megfigyelések aláhúzzák a Tau Herculidák egyedülálló természetét és látványos megjelenési lehetőségét.

A Tau Herculidák egy érdekes esettanulmány a meteorkutatás területén. A részletes megfigyelések, elemzések és előrejelzések jelentősen hozzájárulnak a meteorraj, valamint a meteorrajok áramlásának és az üstökösök viselkedésének tágabb értelemben vett dinamikájának megértéséhez. A folyamatos megfigyelés és a jövőbeli megfigyelési kampányok elengedhetetlenek az előrejelzések finomításához és az üstökösök fragmentációja által befolyásolt meteorrajok összetett természetének megértéséhez. Mivel a Tau Herculidák továbbra is a tanulmányok középpontjában áll, lehetőséget nyújt arra, hogy bővítsük ismereteinket a Naprendszer dinamikus folyamatairól és az üstökösök fejlődéséről.

2.4. Meteorkitörések előrejelzése és modellezése

2.4.1. A meteorraj-kitörések előrejelzésének elméleti alapjai

A meteorzápor-előrejelzések az égi mechanika, a történelmi adatok és az asztrofizikai elméletek kifinomult szintézisei. Ezen előrejelzések középpontjában olyan alapmodellek állnak, amelyek értelmezik az égitestek mozgását és kölcsönhatásait a Naprendszerünkben, elsősorban az üstökösök dinamikájára és törmelékeik szétszóródására összpontosítva.

Az egyik alapvető megközelítés az N-test integrációs modell, amely a Naprendszerben lévő összes égitest közötti gravitációs hatásokat veszi figyelembe. Ez a módszer kulcsfontosságú az olyan események előrejelzésében, mint a 2022-es Tau Herculidák, mivel segít szimulálni, hogy az olyan üstökösökből, mint a 73P/Schwassmann-Wachmann 3, kilövellő részecskék hogyan fognak szétterjedni és potenciálisan keresztezni a Föld pályáját,

segítve a lehetséges meteorzáporok időzítésének és intenzitásának előrejelzését (Rao 2021).

Egy másik kritikus elmélet a pornyom-elmélet (Asher & Arlt 2000), amely szerint az üstökösök a Naphoz közeledve a pályájuk mentén porsávot képző anyagot bocsátanak ki. Ha a Föld kiszámítható időközönként áthalad ezeken a nyomokon, meteorzáporok alakulnak ki. E por sűrűsége és eloszlása, amelyet olyan tényezők befolyásolnak, mint a sugárzási nyomás és az üstökös szétesésének története, döntő fontosságú a meteorrajok előrejelzésében (Sato 2003, Vaubaillon et al. 2005*a,b*, Horii et al. 2008).

A radiánspontról számítások szintén elengedhetetlenek a meteorzáporok előrejelzéséhez, mivel jellemzően az égbolt meghatározott pontjairól sugárzó meteorokat figyelhetünk meg. A meteorraj pályájának és a Föld pályájának metszéspontja kiszámítható a meteorraj radiánspontról számítására (Rao 2021).

Ezen elméleti modellek fejlesztését folyamatosan finomítják a megfigyelési adatok felhasználásával (Jenniskens 2022*b*). A történelmi feljegyzések és megfigyelések rengeteg információt szolgáltatnak a múltbeli események viselkedéséről. A Hubble (Toth et al. 2005, Weaver et al. 2006) és a Spitzer Űrteleszkópok (Vaubaillon & Reach 2010, Sitko et al. 2011) megfigyelései, amelyek a 73P/Schwassmann-Wachmann 3-hoz hasonló üstökösök szétesését figyelték meg, betekintést nyújtanak a törmelék szétszóródásába és a meteorrajok későbbi kialakulásába (Rao 2021). Ezek az adatok segítenek a modellek kalibrálásában, így az előrejelzések pontosabbá és megbízhatóbbá válnak.

2.4.2. Az előrejelzések nehézségei és korlátai

E modellek kifinomultsága ellenére a meteorzáporok előrejelzése kihívásokkal jár. Az üstökösök viselkedésének kiszámíthatatlansága jelentős bizonytalanságot okoz az előrejelzésekben. Az üstökösök váratlan kitöréseket és fragmentálódást mutathatnak (Jenniskens 1995), ahogy azt az SW3 esetében láthattuk, ami megnehezíti az előrejelző modelleket. Emellett a meteoroidok és a Föld légkörének kölcsönhatása összetett, és olyan tényezők befolyásolják, mint a meteoroid mérete, sebessége és belépési szöge, ami befolyásolja a meteorraj láthatóságát és intenzitását (Bronshten 1983, Ceplecha et al. 1998). Továbbá a bolygók által okozott gravitációs perturbációk jelentősen megváltoztathatják a meteoroidok pályáját, ami megnehezíti az előrejelzéseket.

A jelenlegi modelleknek is vannak korlátai és fejlesztendő területei. Nem veszik teljes mértékben figyelembe a meteorzápor-előrejelzésekben szerepet játszó összes változót. Például a nem gravitációs erők, mint például a Jarkovszkij-hatás, idővel megváltoztathatják a meteoroidok pályáját. Ezeket azonban nehéz számszerűsíteni a meteorraj minden egyes részecskéjére (Vaubaillon et al. 2005*a*). Az üstökösökből származó részecskék méreteloszlá-

sa és kilöködési sebessége gyakran olyan feltételezéseken alapul, amelyek nem feltétlenül érvényesek minden eseményre.

A 2022-es Tau Herculidákra vonatkozó változatos előrejelzések jelentek meg a raj érkezése előtt. Egyes modellek jelentős meteorzáport vártak az intenzitás jelentős változatosságával (Lüthen et al. 2001, Horii et al. 2008, Rao 2021, Ye & Vaubaillon 2022, Jenniskens 2022a), míg mások az éves átlagnál csak minimálisan erősebb aktivitásra számítottak (Wiegert et al. 2005). Az előrejelzések finomításához tehát lényeges ennek a zápornak a megfigyelése és elemzése.

Összefoglalva, a meteorzápor-előrejelzések elméleti alapja robusztus és sokrétű, amely dinamikus szimulációkat, történelmi megfigyeléseket és asztrofizikai elméleteket foglal magában. Az üstökösök viselkedésének eredendő kiszámíthatatlansága és a meteoroidok és a Föld légkörének összetett kölcsönhatásai azonban folyamatos kihívást jelentenek. Ahogy a megfigyelési technikák fejlődnek és az üstökösök fizikájának megértése elmélyül, úgy várhatjuk, hogy az előrejelzések egyre pontosabbá válnak, tovább fejtegetve ezen égi látványosságok rejtélyeit.

3. A 2022-es Tau Herculidák meteorraj kitörésének megfigyelése

3.1. Expedíció a McDonald Observatóriumba

A 2022-es Tau Herculidák kitörés előrejelzése után számos kutatócsoport tervezett megfigyelési expedíciót Texasba és Arizonába (Vaubaillon et al. 2023, Tóth et al. 2023, Kac & Ocaña 2023), ahol a maximumot a legjobban meg lehetett figyelni. Mások Kanadában (Egal et al. 2023) vagy Európában (Rendtel & Arlt 2022, Kotten et al. 2023, Dolinsky & Aales 2023) maradtak abban a reményben, hogy láthatják vagy rögzíthetik a Tau Herculidák meteoróit. Magyarországról egy 4 fős csapat indult expedícióra a kitörés megfigyelésére, ahogyan azt Kiss et al. (2023) részletezte.

Az expedíció tagjai Kiss L. László, Sárneczky Krisztián, Igaz Antal és Rózsahegyi Márton voltak. KLL elsődleges területe a változócsillagászat. Az elmúlt 15 évben a Keplerrel, a TESS-szel és a CHEOPS-szal végzett űrfotometriai méréseket. SK a Naprendszer kis égitestjeire specializálódott, különös hangsúlyt fektetve a felfedezésekre. Eddig négy üstökös, 679 számozott, 1029 számozatlan és 250 földszűrlő kisbolygót, valamint öt szupernóvát és két nóvát fedezett fel. IS és RM régóta amatőr csillagászok, de főállású civil munkájuk van, amely nem kapcsolódik a tudományos kutatáshoz.

A Tau Herculidák-kitörés megfigyelésének ötletét SK vetette fel, aki már régóta tisztában volt a lehetőséggel. A McDonald Obszervatóriumba való eljutást a CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet egyik munkatársa, Vinkó József javasolta. Ő tartotta a kapcsolatot a helyi munkatársakkal és intézte el, hogy a társaság az Csillagvizsgáló mellett észlelhessen.

A McDonald Obszervatóriumból a radiáns az előrejelzések szerint a zenittől mindössze néhány fokra haladt el, és az Obszervatórium a Greater Big Bend Nemzetközi Csillagoségbolt-park közepén található, ahol a legszigorúbb világítási szabályok érvényesek.

Egy nagyon késői COVID-19 fertőzés miatt SK nem utazott az expedíciós csapat többi tagjával. Így csak KLL, IA és RM jutott el a McDonald Obszervatóriumba, ahol Györgyey-Ries Judit, Vinkó József és Deme Livia kíséretében két éjszakát töltöttek megfigyeléssel.

3.2. Adatgyűjtés

A megfigyelők vizuálisan észlelték a rajt, és hangfelvételeket készítettek a maximum éjszakáján. Ez segített a vizuális benyomás és a videofelvételek összehasonlításában. Ez utóbbihoz az IA három különböző kamerát használt az alábbiak szerint:

- Egy DMK 33GX236 panelkamera Computar 2,7–8 mm f/1.0 optikával a déli horizont feletti égbolt széles látómezejű leképezéséhez. Ez volt a legalacsonyabb érzékenységgű, nagyjából a vizuális határmagnitúdónak megfelelő.
- Egy mobil AllSky7 kamerarendszer, amelyet az egész égbolt (Hankey 2021) megörökítésére terveztek, sokkal jobb érzékenységgel, mint a kis DMK kamerát.
- Sony $\alpha 7$ S fényképezőgép Sony 24 mm f/1.4 optikával a halvány meteorok észlelésére korlátozott látómezőben.

A Sony fényképezőgép érzékenysége főként ISO 40000-re volt állítva. Így +8,5 magnitúdó körüli határmagnitúdót értünk el. A leghalványabb meteornyomokat körülbelül 0,5–1,0 magnitúdóval fényesebbre becsültük ennél az értéknél, ami kiváló érzékenységet jelez a vizuálisan nem látható fényességtartományban. A látómező 30° volt. A megfigyeléseket 30 perces, hanggal ellátott MP4 videofájlokban rögzítették, 25 fps képkockasebességgel (40 ms képkockánként), mindegyik fájl 11,25 GB adatot tartalmazott.

Összesen 2 órányi megfigyelést végeztek május 30-án, azaz a maximum előtti éjszakán, hogy a csapat tesztelhesse az összes berendezést és a helyi körülményeket a McDonald Obszervatórium látogatóközpontja mellett. Az adatgyűjtést ezután május 31-én egész



3.1. ábra. Május 30-án a McDonald Obszervatórium látogatóközpontja mellett felállított kamerák. A megfigyelésekhez használt három kamera az AllSky7 (középen), a DMK (jobbra) és a Sony $\alpha 7$ (alul). A Hobby-Eberly Teleszkópot (a háttérben) nem használták a Tau Herculidák megfigyelésére. A fotó készítette: RM.

éjszaka folytatták. A Sony kamerával összesen 3,5 órányi felvétel készült néhány hézaggal megszakítva a megfigyeléseket egy 5 órás időablakban (UTC 3 órától UTC 8 óráig).

A megfigyelési stratégia és helyszínválasztás sikeresnek bizonyult. Míg az expedíciós csapat vizuálisan mintegy 220 meteort látott, a maximum éjszakáján Budapest külvárosából mindössze 8 tau herculidát sikerült észlelnem.

3.3. A meteorok katalógizálása

3.3.1. A meteorok beazonosítása

Az expedíció után problémák merültek fel a DMK és az AllSky7 kamerák adatainak visszaállítása során. Emiatt csak a Sony $\alpha 7$ felvételeivel dolgoztunk. A felvételek vizuális vizsgálata azt mutatta, hogy a 8-as magnitúdó feletti halvány és gyors meteorok nagy populációja csak 2-3 képkockán, azaz 80-120 ms erejéig jelent meg. Ez megakadályozta a hagyományos szoftverek, például az RMS (Vida et al. 2016) alkalmazását, mivel az ilyen eszközök által használt algoritmusok gyakran összetévesztik ezeket a halvány meteorokat a zajjal. Az elemzéshez próbáltam alkalmazni gépi tanulsos eszközöket is, mint például az *Fast Meteor Detection Tool*¹ (Kandeepan et al. 2022), de a kód futtatása során többször is problémákba futottam, melyeket a fejlesztőkkel történő személyes egyeztetések után sem sikerült orvosolni. Így nem maradt már, mint az emberi agy kiváló mintafelis-

¹<https://github.com/alsoc/fmdt>



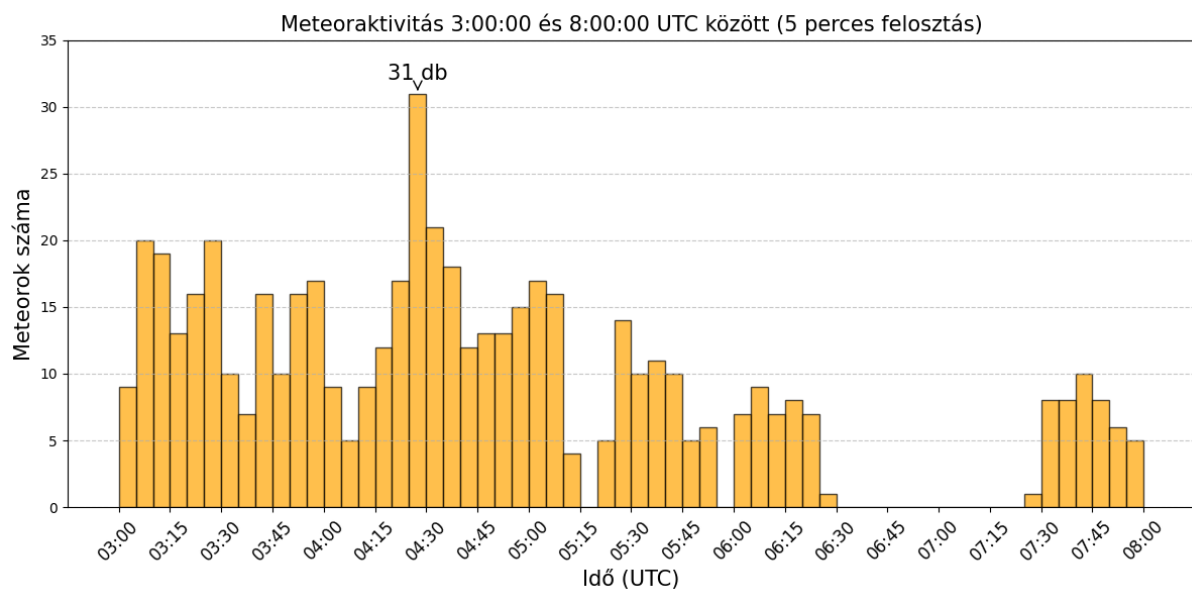
3.2. ábra. Pillanatkép a legfényesebb, -2^m tau herculidáról, amelyet videón rögzítettek. A meteor május 31-én 04:36:07 UTC-kor jelent meg a Corvus csillagképben. Nyomai a videón és a helyszínen távcsővel is több percig láthatóak maradtak. Egy halványabb, $4,5^m$ tau herculida is megjelent a kép jobb oldalán egyvidejűleg.

merő képességének felhasználása. Ezt a módszert Peter C. Slansky javasolta, akinek nagy gyakorlati tapasztalata van hasonló kamerákkal és meteorzáporokkal (Slansky 2021, 2023).

A videókon szereplő összes meteor azonosítására szolgáló módszerünk az volt, hogy teljesen elsötétítettünk egy szobát, és a felvételeket QuickTime segítségével egy LG 55LA8609-es síkképernyős TV-n néztük meg. A videó mérete túl nagy volt ahhoz, hogy egy személy az összes hirtelen változást teljes mértékben rögzíteni tudja, ezért a képernyőt négy kvadránsra osztottuk, és minden kvadránshoz egy-egy személyt rendeltünk.

A két éjszaka alatt rögzített tizenegy 30 perces videón 796 meteort számoltunk meg. Ezek közül 626-ot tau herculidának, 170-et pedig sporadikus meteornak minősítettünk. Minden meteor esetében rögzítettük a videón való megjelenés időpontját, hogy később átkonvertálhassuk UTC-be, valamint a teljes képen belüli hozzávetőleges pozíciót (a középponttól mért távolság és a mező tetejétől mért pozíciószög órákban). Ezek a lépések kulcsfontosságúak voltak a későbbi azonosítás megkönnyítéséhez.

A megfigyelések után 796 meteor maradt a *dátum(MMdd)_UTC(hhmmss)_poláris koordináták(h%)* formátumú egyedi nevekkkel. Ezzel a formázással a 3.2. ábrán látható meteor neve 0531_043607_9h40%.



3.3. ábra. A megfigyelt meteorok időbeli eloszlása. A feltételezett maximumot megjelöltem. 6:30 és 7:30 UTC között nem gyűjtöttek adatokat.

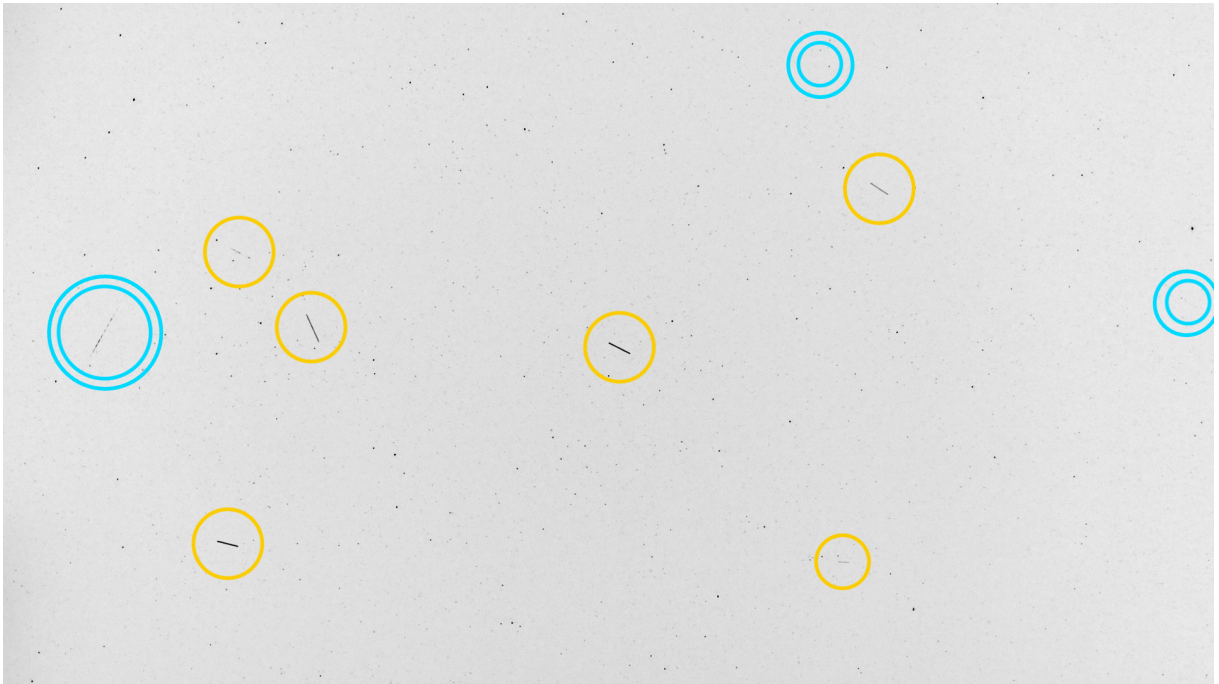
3.3.2. Nehézségek az azonosításnál

A meteorok azonosításának ezen módja nem tökéletes. Emberi hibákkal terhelt, érzékeny a kimerültségre, és nehezen reprodukálható. Különböző módszerekkel kísérleteztünk, hogy a lehető legtöbb ilyen hatást kiküszöböljük.

A sötét környezet kiválasztása kulcsfontosságú volt, mivel a halvány meteorok elveszhetek volna a tükröződések vagy az alkalmazkodni nem tudó szem miatt. Ennek leküzdése érdekében már jóval a megfigyelések megkezdése előtt elsötétítettük a szobát. Még ezekkel az óvintézkedésekkel együtt is szükségünk volt egy bemelegítési időszakra minden megfigyelési szakasz elején. Hogy ez ne befolyásolja a kiértékelést, az ilyen alkalmakon először átnézett videót kontrollként kezdés után pár órával újra átnéztük.

Kísérleteztünk az optimális létszámmal is, hogy a legtöbb meteort számolhassuk meg videónként. Azt találtuk, hogy 3 és 4 ember között 50%-os ugrás volt a megfigyelt meteorok számában. A nézők számának további növelése 4-ről 5-re azonban nem eredményezte a meteorszám további növekedését.

A saját kvadránson kívüli fényes meteorok eléggé elvonhatják a figyelmünket ahhoz, hogy a területünkön belül lemaradjunk egy meteorról. Ez azt jelentette, hogy miután megtaláltunk egy meteort, megállítottuk a felvételt és feljegyeztük a tulajdonságait, néhány másodperccel az eredeti észlelést megelőzően folytattuk a videót. Ez a gyakorlat előnyös volt, mert néha 3-4 meteor volt látható egyszerre, amikor a meteorfluxus megélenkült,



3.4. ábra. Három másodperces videószakasz május 31-én 03:02:21 UTC-től kezdődően a Corona Borealis melletti égboltról. Három meteor (két kör) és hat műhold (egy kör) látható.

ahogy a 3.4. ábrán látható.

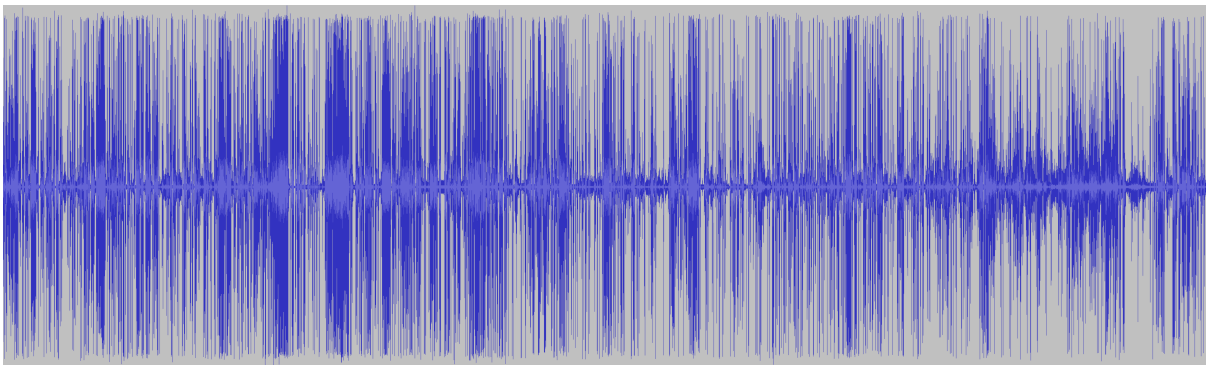
A forró pixelek, a kozmikus sugárzás okozta villanások és a műholdak szintén ugyan-
ezzel a stratégiával kezelt zavaró tényezők voltak.

3.3.3. Lehetséges jövőbeli változtatások

A feldolgozás során a legtöbb időt egyértelműen a meteorok azonosítása vitte el, va-
lamint itt kerülhet a legtöbb hiba is a rendszerbe, így ennek a munkafolyamatnak az
automatizálása prioritás a hasonló munkákhoz.

Mivel a későbbi feldolgozás során a halványabb meteorokat nem használtam fel (Lásd
4.2.1. fejezet), ezért a kamerát használhatjuk kisebb ISO-val. Így csökken a zaj és az
elérhető szoftverek is képesek detektálni a meteorokat. Ugyanakkor ezzel pont a kameránk
rendkívüli érzékenységét veszítjük el.

Elképzelhető, hogy a technika fejlődésével a gépi tanulást használó algoritmusok is
egyre könnyebben elbírnak majd a mostanihoz hasonló adatokkal. Az ilyen szoftverek fej-
lesztéséhez közvetlenül a mi adatsorunk is hasznos lehet, mint tanulási minta. A dolgozat
írása közben is aktívan kapcsolatban vagyok a Fast Meteor Detection Tool fejlesztőivel,
akik nagy érdeklődést mutatnak a felvételeink iránt.



3.5. ábra. A KLL által május 31-én készített felvétel hullámformája. A 220 tüske mindegyike egy-egy meteort jelent, amely elég fényes ahhoz, hogy a megfigyelők láthassák.

3.4. Adatredukálás

3.4.1. Hangfelvételek

A digitális adatgyűjtés mellett a megfigyelők vizuális észlelést is végeztek. Mivel a helyszíni észlelők közül többen is évtizedes rutinnal rendelkeztek, az ő személyes benyomásuk a meteorraj intenzitásáról megerősítheti a mérés és adatkiértékelés eredményeit.

Ahhoz, hogy a helyszíni megfigyeléseket később össze tudjuk vetni az adatokkal, hangfelvételt készítettek. Ahogy a meteormegfigyeléseknél szokás, valahányszor egy megfigyelő meteort látott, „TOP”-ot kiáltott. Ezek a hangfájlból nagy tüskék formájában jelentek meg.

A 3.5. ábrán látható tüskék megszámlálásával egy alsó becslést készíthetünk a szabad szemmel látható meteorok számáról, és egy durva képet kaphatunk a kitörés profiljáról. Ez egy lapos eloszlást mutat, néhány sűrűsödéssel és legalább 220 meteorral az éjszaka folyamán.

3.4.2. Videófelvelelek

Az egyes meteorok pontos elemzéséhez létrehozam egy eljárást, amely több python-kód segítségével az MP4 videófolyamból a meteorokat ábrázoló FITS fájlokat készít. Minden egyes meteor megjelenése előtt 1 másodperccel és utána 1 másodperccel kivettem a képkockákat, így biztosítva, hogy a teljes nyomot rögzítsem. Ez kulcsfontosságú a későbbi szakaszokban, ahol pontos illesztésre van szükség.

A kinyerés megkezdéséhez a szkriptemnek szüksége van a meteor nevére, a dátumra, a videó azonosítójára és az időbélyegekre. Az adatbázis a 3.3.1. fejezetben részletezett

azonosítási folyamat során jött létre. Az `ffmpeg`², szoftvert használtam a szükséges képkockák aprólékos kinyerésére, biztosítva, hogy a meteor teljes útvonala látható legyen az elemzéshez.

Ezután az egyes képkockákat egyetlen, részletes képpé egyesítettem. Különböző, az asztrofotózásban általánosan használt, zajcsökkentő képességeikről ismert egymásra rakási módszerekkel kísérleteztem. Hamar rájöttem azonban, hogy míg ezek a módszerek javítják az égitestekről készült képeket, hajlamosak eltüntetni a meteorok finom, de fontos részleteit, például a halvány nyomvonalait. Számomra kiemelkedően fontos volt, hogy olyan zajcsökkentés nélküli összeadási módszert válasszak, amely megőrzi ezeket a finom részleteket, és biztosítja, hogy a meteor teljes pályája látható és jól körülhatárolt legyen a további elemzéshez. Ez vezetett arra, hogy egy árnyaltabb megközelítést válasszak, amely megőrzi a meteor pályájának integritását.

A módszer megvalósításához a Siril csillagászati képfeldolgozó eszközhöz és annak Python-könyvtárához, `pySiriL`³ fordultam. Ez a könyvtár biztosította azt a rugalmasságot és pontosságot, amelyre szükségem volt ahhoz, hogy az összeadás folyamatát az én egyedi igényeimhez igazítsam. Az eredményül kapott FITS-fájl a meteort és annak a képkockán átvezető útjának részletes rögzítését ábrázolja. Példa a 3.6. ábrán látható.

3.4.3. A meteorok koordinátáinak meghatározása

Az `Astrometry.net`⁴ offline adatbázisát használtam, hogy az összeadott képkockákat WCS asztrometriai megoldást tartalmazó FITS-fájlokká konvertáljam, így a pályák égi koordinátái elérhetővé váltak.

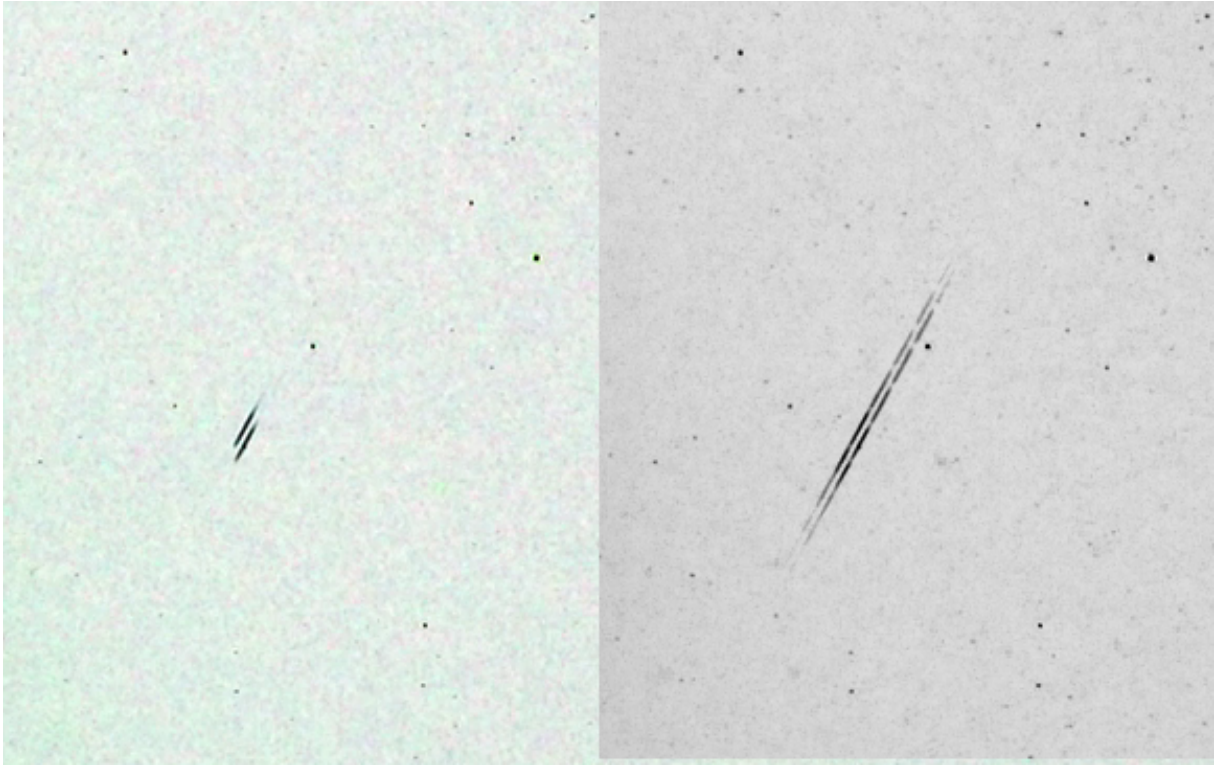
Az egyes meteorok helyzetének meghatározásához kézzel mentünk végig ezeken a képeken SK-val, hogy megmérjük a meteorcsík végpontjainak és középső pontjának rektasz-cenzióját (RA) és deklinációját (DEC). Azért választottuk ezt a kézi megközelítést, mert ez megfelel a meteorpályák árnyalt és változatos természetének, amelyek pontos azonosításához és méréséhez gyakran éles szemre van szükség. Például, ahogy a 3.4. ábrán látható, a műholdak és a meteorok hasonló nyomokat hagyhatnak az összeadott képeken. Egy vonalfelismerő eszköz nem tudná megtalálni a különbséget a kettő között. Ezt úgy oldottam meg, hogy a koordináták kinyerésével párhuzamosan kis videoklipeket exportáltam a meteorokról, hogy azokat felülvizsgálhassuk.

Miután végimentünk ezeken a lépéseken, végül 775 meteort kaptunk mért koordiná-

²<https://ffmpeg.org/>

³<https://gitlab.com/free-astro/pysiril>

⁴<http://astrometry.net>



3.6. ábra. A 0531_045504_08h80% „iker meteor” az összeadás előtt (balra) és után (jobbra). A látómező körülbelül 3° .

tákkal, ami 97%-os sikerességi arányt jelent. Több „elveszett meteor” részletes vizsgálata során kiderült, hogy téves pozitív észlelés, sikertelen asztrometria vagy sikertelen azonosítás okozta őket.

3.4.4. Fényességbecslés

A 2022-es Tau Herculidák kitörés ZHR-jének későbbi kiszámításához a populációs indexet (r) is ki kell számítani, ahogyan a 3.1. egyenletben látható. Ehhez pontos fényességbecslésekre volt szükségünk.

$$\overline{ZHR} = \frac{\overline{HR} \cdot F \cdot r^{6,5-lm}}{\sin(h_R)} \quad (3.1)$$

$\overline{HR} = N/T_{eff}$ a meteorok óránkénti száma. N a megfigyelt meteorok száma és T_{eff} az észleléssel töltött idő. Itt N 459 meteor, az effektív idő pedig 3,5 óra volt. Az F egy látómező-korrektíós tényező. A felhőborítottság vagy más akadályok kompenzálására szolgál. Mivel a megfigyelések során tiszta volt az ég, ez a tényező 1. A populációs index (r) a megfigyelt meteorok számának növekedését mutatja a magnitúdó változásával. Ezt az lm határmagnitúdóval korrigálják. h_R a radiáns magassága a horizont felett.



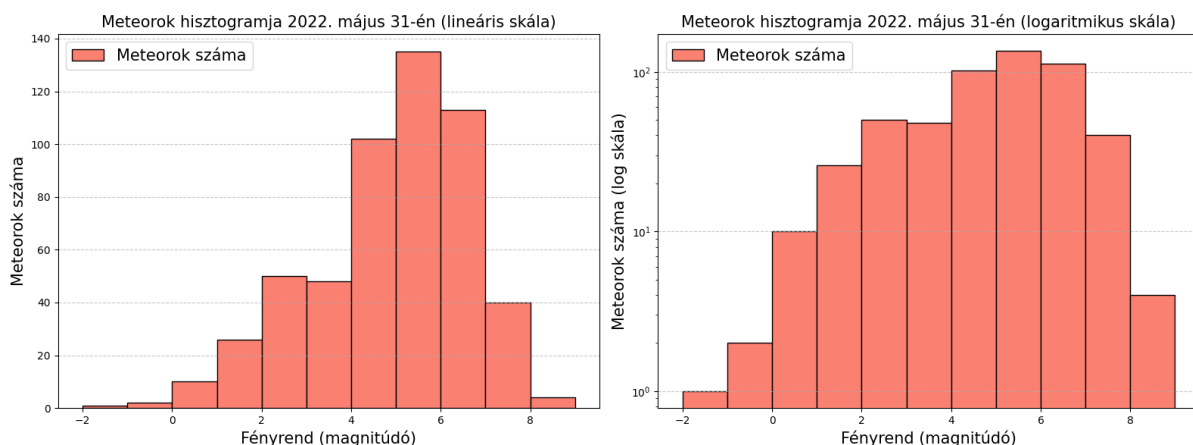
3.7. ábra. Összehasonlító csillagok a Corvus és a Leo csillagképekben. Ezeket a csillagokat referenciapontokként használtuk a meteorok fényességének becsléséhez.

Ismét a fotovizuális módszerhez fordultunk, hogy meghatározzuk az egyes meteorok fényességét. Az összehasonlító csillagok használata jól ismert a meteorkutatásban. A 3.4.3. fejezetben bemutatott pontos asztrometriával a látómezőben lévő ismert csillagok azonosítása triviális. A pontosabb becslés érdekében az összes lehetséges fényességsztályból választottunk összehasonlító csillagokat.

A meteorok felvételeit újra megnéztük, és három megfigyelő (KLL, SK, SZON) független becsléseinek átlagát határoztuk meg a meteorok vizuális fényességeként.

A 3.8. ábrán látható hisztogram megmutatja a fényes meteorok számának markáns csökkenését. Bár lehet, hogy ez a fényes összehasonlító csillagok hiányából adódik, ami korlátozta képességünket a legfényesebb meteorok fényességének pontos becslésére, logaritmikus skálán ábrázolva nem tűnik kilógónak a fényes meteorok csökkenése, így ez feltételezhetően valóban a kevés számú meteorok tudható be. A hisztogram a halványabb végeken elvékonyodást mutat, ami a leghalványabb meteorok észlelési hatékonyságának csökkenésére utal, valószínűleg a berendezésünk korlátai miatt.

A jövőben egy automatikus meteorfotometriai algoritmus kifejlesztése elengedhetetlen ahhoz, hogy más tanulmányokkal összehasonlítható adatokat szolgáltatassunk.



3.8. ábra. Az ábra a meteorok fényességének gyakorisági eloszlását mutatja május 31-én.

4. Adatelemzés

A videómegfigyelések elemzésének új módszereinek kifejlesztése mögött a motiváció, hogy az egy helyszínen végzett megfigyelésekhez szükséges eszközök hiányát orvosoljuk. Amint azt a 2.2.4. fejezetben láttuk, a kortárs fejlesztések elsősorban a többállomásos hálózatokkal, például a GMN vagy az AllSky7 hálózattal foglalkoznak. Azonban, ahogyan azt számos meteorkitörés esetében látjuk, ezek az események gyakran távoli helyeken következnek be, ahol nincs már meglévő meteormegfigyelési infrastruktúra.

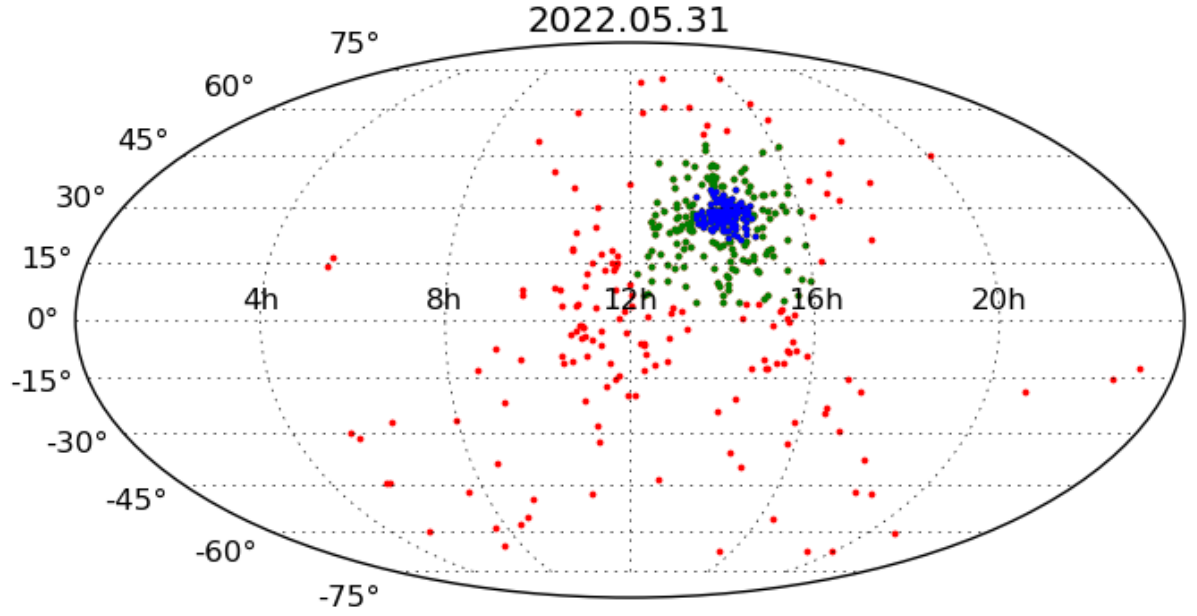
A hagyományos elemzési módszerek alkalmazásához több expedíciós csapatot kellene kiküldeni egymástól viszonylag távol eső, távoli helyekre, ami megnövelné az ilyen kutatási expedíciók költségeit, és lehetetlenné tenné a kisebb kutatóközpontok, érdeklődő civilek hozzájárulását. Ezért ebben a szakaszban új megközelítést javaslok az egy helyszínen végzett videós megfigyelések adatainak elemzésére.

4.1. Radiánsmeghatározás

A 2022-es Tau Herculidák kitörés radiáns pozícióját két különböző módon határoztam meg. A cél egy új radiánsszámítási módszer kidolgozása volt, amely alkalmazható nagyobb rajok esetén is.

4.1.1. A párosítás módszere

A kezdeti megközelítés a szakirodalomban ismertett hagyományos párosítási módszertan volt, pl. Schmitt (2004). Ezt a megoldást Vinkó József hathatós segítségével sikerült felhasználni. A módszer szükségessé tette a párosítási probléma megoldását úgy,



4.1. ábra. A meteorpárok metszéspontjai. A pontok szűrésére sigma clipping módszert alkalmaztunk, így két lépésben először a piros, majd a zöld színnel jelölt metszéspontokat elhagytuk. A kék pontok mediánját és szórását vettük a Tau Herculidák látszólagos radiáns pozíciójának és annak bizonytalanságának (lásd a 4.1. táblázatot).

hogy a meteorkettősök kiválasztása ne legyen befolyásoló tényező a végeredményben. A leghatékonyabb stratégia a meteorok véletlenszerű párosítása volt.

A mért meteor nyomok egyes párojainak metszéspontját a következőképpen számítottuk ki. Először az egyes meteor nyomok kezdetének és végének RA (α) és DEC (δ) koordinátáit alakítottuk át derékszögű koordinátákká a következő módon.

$$\begin{aligned} x &= \sin(\pi/2 - \delta) \cdot \cos(\alpha) \\ y &= \sin(\pi/2 - \delta) \cdot \sin(\alpha) \\ z &= \cos(\pi/2 - \delta) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Így $\mathbf{r} = (x, y, z)$ a meteorpálya egy pontja és a Föld középpontja közötti vektor.

A $\mathbf{r}_{\text{beg}}$ és $\mathbf{r}_{\text{end}}$ által meghatározott síkra merőleges normálvektort vektorok keresztszorzataként adható meg:

$$\mathbf{n} = \mathbf{r}_{\text{beg}} \times \mathbf{r}_{\text{end}}. \quad (4.2)$$

Minden i, j meteorpár normálvektorainak vektorszorzata határozza meg a radiáns egységvektorát:

$$\mathbf{R} = \mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j. \quad (4.3)$$

Végül a radiáns derékszögű koordinátáit (Rx, Ry, Rz) visszaváltottattuk égi koordinátákká a következő formában:

$$\begin{aligned}\alpha_R &= \cos^{-1}(Rx/\sqrt{Rx^2 + Ry^2}) \\ \delta_R &= \sin^{-1}(Rz/\sqrt{Rx^2 + Ry^2 + Rz^2}).\end{aligned}\tag{4.4}$$

Így minden egyes meteorpárhoz kaptunk egy mintát a radiánsból (a pályák metszéspontjaiból).

Mivel a sporadikus meteorok jelenléte befolyásolhatja a számított radiánspozíciót, a bemeneti adatokat úgy szűrtük, hogy csak azokat a meteorokat választottuk ki, amelyeknek a nyomvonala nagyjából a Coma Berenicesben várható radiáns felé mutatott. (Lásd 3.3.1) Így a mintában még mindig jelen lévő szórványos meteorok okozta szórást jelentősen csökkentettük.

Ezután egy sigma clipping szűrőt alkalmaztunk a számított metszéspontokra, eltávolítva azokat a pontokat, amelyek egy szigmánál nagyobb mértékben tértek el a mediánértéktől. Az algoritmus 2 iterációs lépés után konvergált egy néhány fokos szórású radiánsához. Az eljárást a 4.1. ábra szemlélteti május 31-re vonatkozóan, a két éjszakára számolt radiánspozíciókat pedig a 4.1. táblázat tartalmazza.

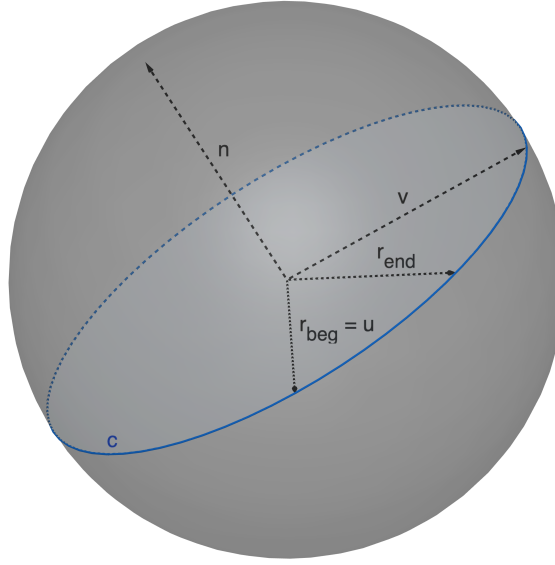
Dátum	N	α (fok)	$\Delta\alpha$ (fok)	δ (fok)	$\Delta\delta$ (fok)
2022. május 30.	27	214,2	6,9	+23,5	4,3
2022. május 31.	224	213,1	4,0	+28,6	2,4

4.1. táblázat. A 2022-es Tau Herculidák radiánsának számított koordinátái. Az N a megmaradt meteorok számát adja meg a sigma clipping két lépése után.

4.1.2. A radiáns meghatározásának hőtérképes módszere

A hagyományos módszer párosítási problémájának megkerülésére hoztam létre a hőtérképmódszert. Ehhez minden meteor pályáját egy égi gömbre vetítettem, és egy főkört illesztettem a pályájához. Ezután a meteorpályákat hőtérképen ábrázoltam. A legforróbb területek így a meteorraj radiánsa és antiradiánsa.

A meteor főköre kiszámítható a meteor kezdő- és végpontjainak ismeretében. Először az RA (α) és DEC (δ) koordinátákat alakítjuk át derékszögű koordinátákká, ahogyan az a 4.1. egyenletben látható. Ha találunk két ortonormális vektort, $\mathbf{u} = \mathbf{r}_{\text{beg}}$ és $\mathbf{v} = \mathbf{n} \times \mathbf{r}_{\text{beg}}$ (lásd 4.2. ábra), mindkettő a főkör síkjában, akkor a főkör egyenlete az egységgömbön a



4.2. ábra. A nagy kör, amely a meteornek az égi gömbhöz viszonyított pályájához kapcsolódik. A 4.5. egyenletben szereplő vektorok fel vannak címkézve.

következő lesz:

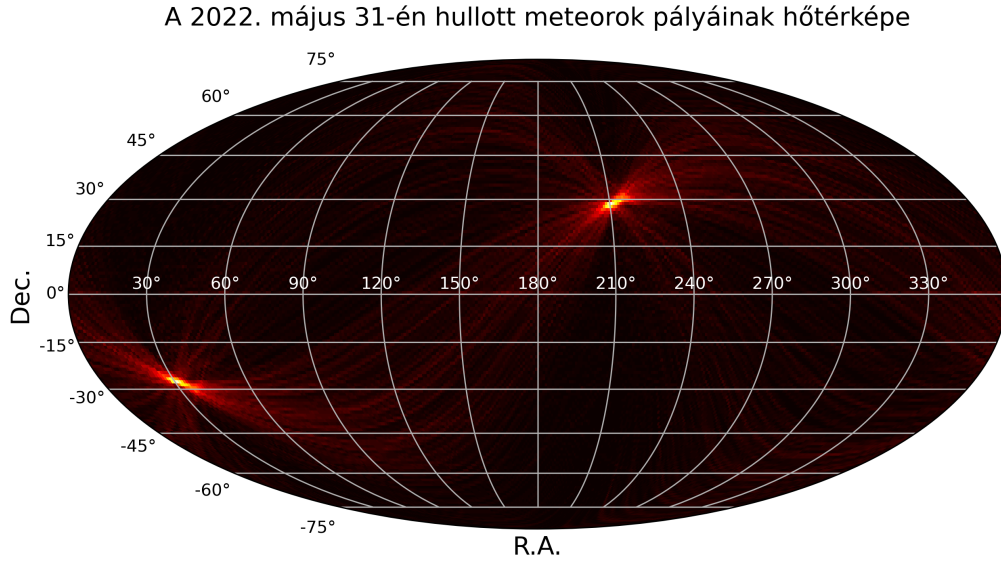
$$c = \mathbf{u} \cos \omega + \mathbf{v} \sin \omega \quad (4.5)$$

$$0^\circ \leq \omega < 360^\circ.$$

Ezzel a módszerrel minden meteor két vektorként tárolódik, és kérésre kiszámítható a főköriük. A körök generálása után minden meteort egy égbolt-vetületre rajzolunk. Az így kapott hőterkép, amelyet a 4.3. ábrán látunk, a raj radiánsának és az antiradiánsának megfelelő helyen pályák sűrűsödését mutatja.

Az ábrán két "meteorcsalád" rajzolódik ki hasonló pályákkal. Ez annak köszönhető, hogy a kamerát IA az éjszaka során egyszer átfordította a radiánshoz közelebbi területre. A látszólag két hasonló pályaköteg így a két látómezőhöz trátózik. Amennyiben egyszerre több kamerával, vagy egy kamerával egymás után az egész eget lefedtük volna, úgy a teljes ég telítődött volna vonalakkal és nem tapasztalnánk ilyen látszólagos jelenséget.

A meteorraj radiánsának meghatározásához 2D Gauss-illesztést alkalmaztam a forró területre. A koordináták a 4.2. táblázatban láthatók.



4.3. ábra. Az ábrázolás egy égtérképet mutat be, ahol főkörök jelölik az egyes meteorokat. A legforróbb területek a Tau Herculidák meteorraj május 31-én megfigyelt radiáns és antiradiáns helyét jelzik. (Lásd a 4.2. táblázatot.)

Dátum	α (fok)	$\Delta\alpha$ (fok)	δ (fok)	$\Delta\delta$ (fok)
2022. május 30.	207,00	2,11	+23,00	5,94
2022. május 31.	209,71	1,01	+27,73	0,07

4.2. táblázat. A 2022-es Tau Herculidák radiánsának számított koordinátái a hő térképes módszerrel.

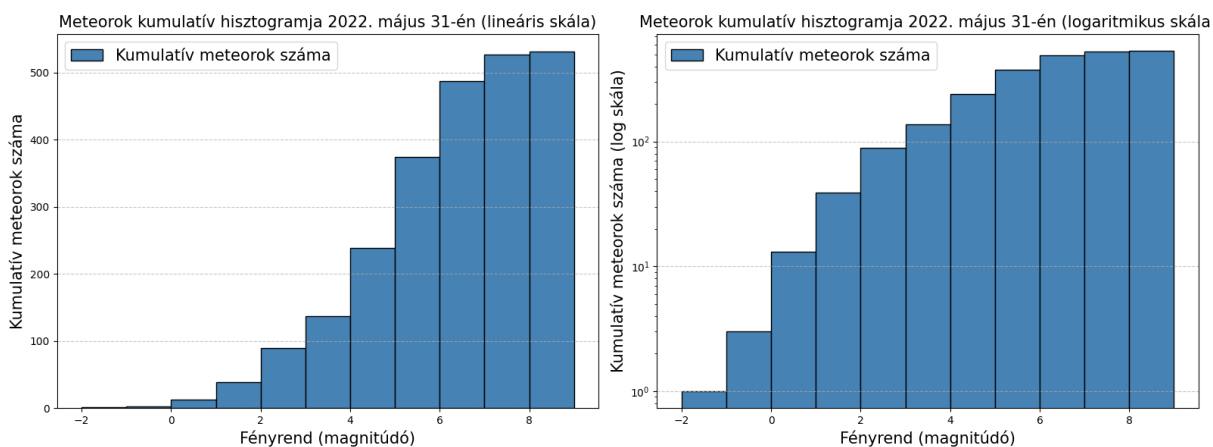
Mindkét módszerrel azt látjuk, hogy bár hibahatáron belül, de a raj radiánsa a két nap alatt mozgott. Ez leginkább azzal magyarázható, hogy a 2022-es kitörést okozó porfehér felhő mellett több különböző, valószínűleg az 1960-as évek előtt kidobódott (Egal et al. 2023) felhő is aktív volt.

4.2. A raj egyéb tulajdonságai

4.2.1. A populációs index meghatározása

A populációs index, r , egy döntő fontosságú paraméter, amely a halvány és a fényes meteorok relatív gyakoriságát jelzi egy meteorrajban. A Tau Herculidák 2022-es kitörése során vizuálisan megbecsültük az egyes meteorok fényességét, ahogyan azt a 3.4.4.

fejezetben részleteztem.



4.4. ábra. A meteorok fényessége kumulatív hisztogramon ábrázolva.

Jelentős csökkenést tapasztaltunk az észlelt meteorok számában mind a fényesebb, mind a halványabb végén az adatainknak. Ez valószínűleg az adatgyűjtés és a becslési fázis során elkövetett szisztematikus hibáknak tudható be. Emiatt az összes $+6,5^m$ -nál halványabb meteort elhagytam, ami a határmagnitúdónkat $+6,5$ -re teszi. Így is 459 tau herculida maradt. A meteormagnitúdók széles skálájának jobb ábrázolása érdekében létrehoztam egy logaritmusos skálán ábrázolt eloszlási hisztogramot is (lásd 3.8. ábra).

A populációs index azt mutatja meg, hogyan oszlik el a meteorraj fényessége. Azt méri, hogy a meteorok összlétszáma mennyivel nő, ahogy a határmagnitúdó 1 magnitúdóval nő. Ez az index döntő fontosságú a ZHR-ek és a fluxussűrűségek kiszámításához. Ezen kívül átalakítható tömegindexre, amely információt nyújt a meteorrajban lévő részecskeméretekről (Molau 2015). Egy kis populációs index (3-nál kisebb) a fényesebb meteorok sokaságára utal, míg a magasabb értékek sok halvány meteorra utalnak.

A populációs index meghatározásához kumulatív hisztogramon ábrázoltam a meteorok fényességét (lásd 4.4). Erre a hisztogramra egyenest illesztve az $r = 2,51 \pm 0,35$.

4.2.2. ZHR számítás

A 2022-es Tau Herculidák kitörés ZHR-ének kiszámításához a 3.1. egyenletet használtam. Ehhez a radiáns ekvatoriális koordinátáiról (lásd 4.2. táblázat) át kell konvertálnunk a McDonald Observatóriumból megfigyelt horizontális koordinátákra. Az átváltás az obszervatórium földrajzi szélessége és a helyi sziderikus idő (LST) figyelembevételével történik. A McDonald Observatórium a $30,6789^\circ N$ szélességi fokon és a $-104,0247^\circ W$ hosszúsági fokon található. Az észlelés 1910 m tengerszint feletti magasságból történt.

Az ekvatoriális koordinátarendszer a csillagokhoz képest rögzített, a deklináció (δ) az égi egyenlítőtől északra vagy délre lévő szögtávolságot, a rektaszcenzió (α) pedig az égi egyenlítő mentén keletre lévő szögtávolságot méri. Ezzel szemben a vízszintes koordinátarendszer a megfigyelőre lokális, a magasság (a) a horizont feletti szögtávolságot, az azimut (A) pedig a horizont menti szögirányt méri. Az egyenlítői koordinátákból a vízszintes koordinátákba való átalakítás gömbi trigonometriával történik, a megfigyelő helyi sziderikus idejének (LST) felhasználásával, amely összeköti a helyi égboltot az éggömbbel.

Az első lépés a Tau Herculidák radiáns helyi óraszögének (H) meghatározása. Az óraszög az az idő, amióta az égi objektum utoljára keresztezte a megfigyelő meridiánját, és az LST és a radiáns ökoordinátájának különbségéből adódik:

$$H = \text{LST} - \alpha. \quad (4.6)$$

Ezt az értéket ezután órákról fokokra alakítjuk át. A H , a megfigyelő földrajzi szélessége (φ) és a sugárzó deklinációja (δ) ismeretében a radiáns horizont feletti magassága (a) a következő, a gömbháromszögekre vonatkozó koszinuszszabályból levezetett képlet segítségével számítható ki:

$$\sin(a) = \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(H). \quad (4.7)$$

A szinusz- vagy koszinusz-törvényt használhatjuk a radiáns azimutszögének (A) meghatározására. A szinusztörvény egyszerűbb számítást tesz lehetővé:

$$\sin(A) = -\sin(H) \cos(\delta) / \cos(a). \quad (4.8)$$

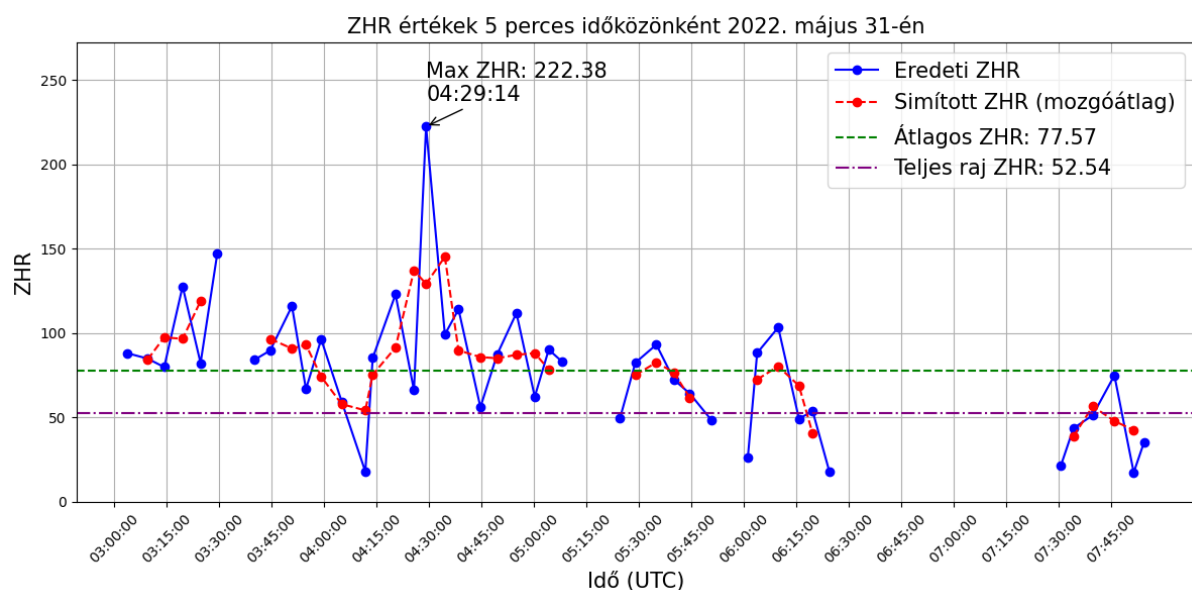
Alternatívaként a gömbháromszögekre vonatkozó koszinutörvény is használható:

$$\cos(A) = [\sin(\delta) - \sin(\varphi) \sin(a)] / [\cos(\varphi) \cos(a)]. \quad (4.9)$$

Mindkét módszer megadja az azimutot (A), így az átváltás meg is van.

Ez meghatározza a Tau Herculidák meteorraj radiánsának horizontális koordinátáit, ahogyan azt a McDonald Observatóriumból megfigyelték. Hogy az egész éjszakát egyetlen időbeli referenciával ábrázolhassam, a rögzített meteoroeseményekből a medián időpontot választottam, ami 04:38:49 UTC volt.

A határmagnitúdót meghaladó meteorok kizárása után a 459 meteorból álló maradék adathalmaz segítségével határoztam meg a ZHR-t. A ZHR hibáját Poisson-eloszlást



4.5. ábra. A grafikon a Tau Herculidák meteorraj 2022. május 31-i ZHR változását ábrázolja. A meteorraj csúspontja egyértelműen 04:29 UTC-kor figyelhető meg.

feltételezve számoltam ki.

UTC	N	T_{eff} [h]	α [fok]	δ [fok]	φ [fok]	a [fok]	r	lm	ZHR	ΔZHR
04:38:49	459	3,5	209,71	+27,73	+30,67	84,41	2,51	7,5	52,54	2,45

4.3. táblázat. A Tau Herculidák ZHR-jének kiszámításához használt értékek a 3.1. egyenlethez és az így kapott ZHR.

4.2.3. A kitörés maximuma

Minden ötperces megfigyelési intervallumra kiszámoltam a ZHR-t, hogy meghatározhassam a meteorkitörés maximumát. A kitörés tetőpontját azon a ponton azonosítottam, ahol a ZHR-érték eléri a maximumát, amint az a 4.5. ábrán látható.

A 4.5. ábrát megvizsgálva látható, hogy a május 31-én megfigyelt meteoreső ZHR-ében egyetlen feltűnő csúcs van, 04:29 UT-kor. Ez a csúcs kiemelkedik a grafikus ábrázoláson, és a katalogizálási fázisban is érezhetően érezhető volt. Az intenzitás csúcsidőszakában rögzített adatok különösen figyelemre méltóak voltak; 20 perc alatt 87 meteort katalogizáltunk, amelyek közül elképesztő 43 meteort érkezett egy rövid 5 perces ablakban.

5. Eredmények

5.1. Új módszer meteorrajok elemzésére

5.1.1. A hőtérkép előnyei

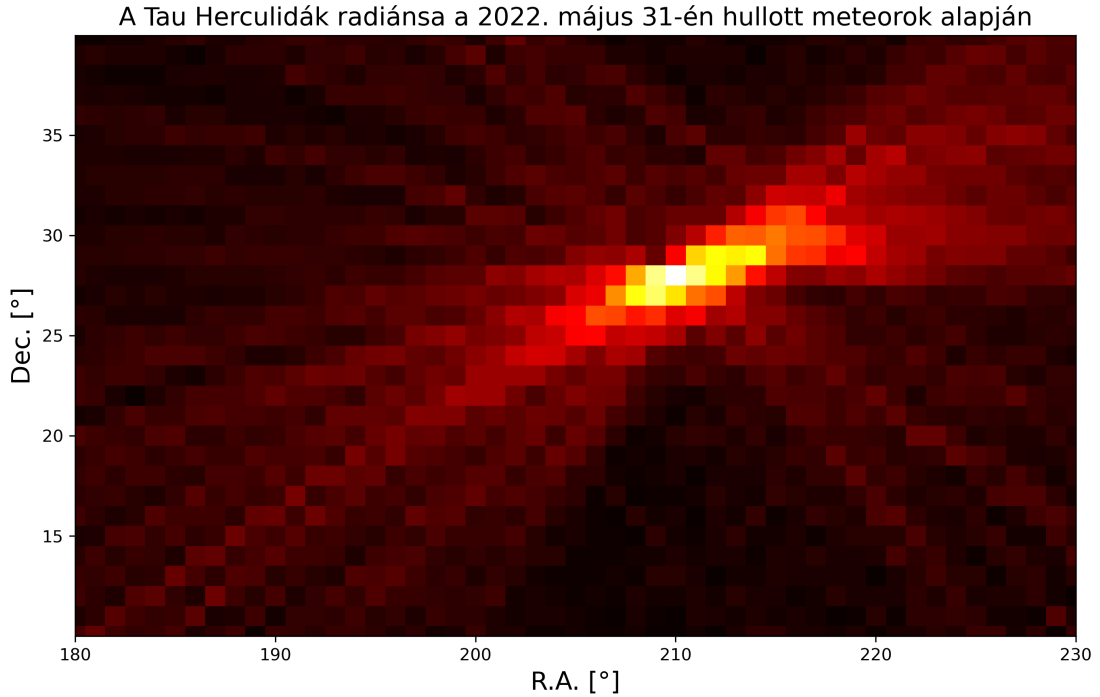
A meteorzáporok olyan magával ragadó égi események, amelyek mind az amatőr rajongókat, mind a hivatásos csillagászokat vonzzák. E jelenségek megértéséhez elengedhetetlenül fontos a radiánsaik elemzése. A radiánsok elemzésének hagyományos módszerei hatékonyak, de gyakran nem elég pontosak, vagy ugyanazon meteorok többszöri észlelését igénylik különböző megfigyelőktől. A hőtérkép-módszer egy újszerű megközelítés, amely ezt a hiányosságot hivatott pótolni, és a meteorzáporok radiánselemzésének pontosságának és hozzáférhetőségének javítását célozza.

A hőtérkép-módszer (részletesen a 4.1.2. fejezetben) a megfigyelési adatokat és a számítási technikákat kombinálja a radiáns cíójának vizuális ábrázolásához. A módszer kiemeli a nagy meteorsűrűségű területeket a megfigyelt meteorok kétdimenziós síkon való ábrázolásával és egy hőtérképes ábrázolás alkalmazásával, így a radiánst fokozott pontossággal lehet meghatározni. Ez a megközelítés nemcsak a radiánsok azonosításának pontosságát finomítja, hanem könnyen értelmezhető vizuális ábrázolást is biztosít a további elemzéshez.

A 2022-es Tau Herculidák meteorraj kitűnő tesztalanyként szolgált a hőtérképes módszerhez. Az előre jelzett kitörés miatt biztosra lehetett venni, hogy több csapat viszonylag jól meghatározott radiánst fog szolgáltatni. A megfigyelési adatokat aprólékosan gyűjtötték a zápor csúcspontján, biztosítva a meteorkövetés pontosságát és következetességét. A Tau Herculidák gazdag adathalmazt szolgáltatott az elemzéshez.

A hőtérkép-módszer alkalmazása magában foglalta a megfigyelt meteorok katalogizálását, látszólagos pályáik kivetítését egy égi gömbre, ezen pályák átalakítását a hőtérkép-elemzésre alkalmas kétdimenziós koordinátarendszerbe, és a hőtérkép-felület alkalmazását (lásd 5.1. ábra). Ez az eljárás azonnal kiemelte a Tau Herculidák radiánsát, bizonyítva a módszer hatékonyságát egy valós forgatókönyvben.

A hőtérkép-módszer jelentős előnye az alacsony számítási igény, különösen az olyan összetettebb megközelítésekhez képest, mint a párosítási algoritmus. Míg a párosítási algoritmus intenzív számításokat igényel az egyes meteorpályák elemzéséhez és egyeztetéséhez, a hőtérkép-módszer az adatok egyszerű vizuális megjelenítésével egyszerűsíti a folyamatot. Ez a hatékonyság gyorsabbá és hozzáférhetőbbé teszi a hőtérkép-módszert, mivel kevesebb számítási teljesítményt igényel.



5.1. ábra. Közelkép a radiánsról a május 31-i tau herculida meteorok felhasználásával készített hőtérképen.

Továbbá, a módszer képessége, hogy vizuálisan ábrázolja a meteoraktivitás sűrűségét és a radiánshoz közeli szóródást, értékes oktatási és tudománykommunikációs lehetőséget nyújt, így az adatok szélesebb közönség számára is hozzáférhetővé válnak. Rugalmassága és alkalmazkodóképessége alkalmassá teszi a módszert különböző meteorrajok esetében, függetlenül azok intenzitásától és időtartamától, az adatokban szereplő szórványos meteorok számától, illetve párhuzamosan aktív rajoktól.

Ugyanakkor látható a 4.3. ábrán is, hogy a módszer érzékeny a megfigyelt égterület elhelyezkedésére, ahogy azt a 4.1.2. fejezetben tárgyaltam. Ugyanígy a megfigyelési körülményeknek tudható be az 5.1. ábrán a radiáns lapos kinézete és ez magyarázza a 4.1. táblázatban látható különbséget a rektaszcenziós és deklinációs értékek bizonytalanságai között.

Összefoglalva, a hőtérkép-módszer jelentős előrelépést jelent a meteorrajok radiánsának elemzésében. Sikeres alkalmazása a 2022-es Tau Herculidák kitörésre és a párosító algoritmushoz képest alacsony számítási igénye mutatja a benne rejlő lehetőségeket, mint nagy teljesítményű, hatékony és felhasználóbarát eszközben.

Publikáció	RA [fok]	Δ RA [fok]	Dec [fok]	Δ Dec [fok]
Szabó et al. (2023) (párosítás)	213,1	4,0	+28,6	2,4
Szabó et al. (2024) (hőtérkép)	209,71	1,01	+27,73	0,07
Lüthen et al. (2001) (előrejelzés)	205,4	-	+29,2	-
Horii et al. (2008) (előrejelzés)	209,48	-	+28,13	-
Rao (2021) (előrejelzés)	210,17	-	+25,03	-
Ye & Vaubaillon (2022) (előrejelzés)	209,4	-	+28,3	-
Vida & Segon (2022)	208,6	0,04	+27,7	0,04
Jenniskens (2022a)	209,17	0,09	+28,21	0,07
Koten et al. (2023)	209,17	0,14	+27,86	0,12
Egal et al. (2023)	209,41	0,03	+28,54	0,07

5.1. táblázat. A 2022-es Tau Herculidák meteorraj független kutatócsoportok által előrejelzett és megfigyelt radiánspozícióinak összefoglalása.

5.1.2. A 2022-es Tau Herculidák radiánsának meghatározása

A meteorraj radiánshelyzetének megértése létfontosságú a meteorraj eredetének és űrbeli pályájának megértéséhez. A 4.1. fejezetben két független módszert mutattam be a 2022-es Tau Herculidák radiánshelyzetének meghatározására.

A meglévő szakirodalommal összehasonlítva ezen dolgozat eredményei erős egyezést mutatnak (lásd 5.1. táblázat). Ez az egyezés megerősíti a hőtérkép-módszer és az ebben az elemzésben használt számítási technikák megbízhatóságát. Rávilágít továbbá a meteorzárók radiánsának előrejelezhetőségére, amelyek az üstökösök dinamizmusa ellenére időben hajlamosak viszonylag stabilak maradni.

Ugyanakkor kisebb eltérések mutatkoztak a számított radiáns pozícióértékek és a más tanulmányokban közölt értékek között. Ezek az eltérések valószínűleg a megfigyelési körülmények, a berendezések vagy az elemzési módszerek eltéréseire vezethetők vissza.

5.2. A 2022-es Tau Herculidák populációs indexének és ZHR-ének meghatározása

A populációs index és a ZHR meghatározása kulcsfontosságú mérőszámok a meteorzárók viselkedésének és jellemzőinek megértéséhez. A populációs index a meteorrajban lévő meteorok fényességeloszlását méri. Az r magasabb értéke a halvány meteorok nagyobb arányát jelzi.

Az ebben a dolgozatban a 2022-es Tau Herculidák kitörésre számított populációs index 2,51 volt. Ez az érték egybe vág az 5.2. táblázatban látható más tanulmányokban közölt értékekkel. A megfigyelési technikák, a berendezések érzékenysége és az adatfeldol-

Publikáció	r	Δr	ZHR	ΔZHR
Jelen dolgozat	2,51	0,35	53	2
Szabó et al. (2024)	5,56	1,83	132	-
Miskotte (2022)	2,63–3,06	-	58	3
Weiland (2022)	2,3–2,9	-	40–50	-
Rendtel & Arlt (2022)	2,40	0,06	55	7
Jenniskens (2022a)	3,79	0,12	40	-
Vaubailion et al. (2023)	2,01	-	-	-
Koten et al. (2023)	2,55	-	-	-
Egal et al. (2023)	2,5	-	20–50	-

5.2. táblázat. A 2022-es Tau Herculidák meteorraj független kutatócsoportok által számított populációs indexeinek (r) és ZHR értékeinek összefoglalása.

gozási módszerek eltérései hozzájárulhatnak a számított populációs indexben mutatkozó különbségekhez.

A ZHR megbecsüli azon meteorok számát, amelyeket egy megfigyelő tökéletes körülmények között, a radiáns zenitben való állása esetén látna. A 2022-es Tau Herculidák kitörés esetében a számított ZHR 52,54 volt, ami megerősíti az 5.2. táblázatban szereplő más tanulmányokban közölt értékeket.

A minimális eltérések a meteorzáporok velejárói, de a különböző csapatok által használt megfigyelési körülmények és berendezések is befolyásolják őket. Vaubailion et al. például repülőgépről végzett megfigyeléseket (Vaubailion et al. 2023), amely egyedülálló, földfelszíni légköri zavaroktól mentes kilátópontot biztosított, míg mások különböző mértékű felhőborítottsággal szembesültek, vagy Európából vagy Kanadából figyelték meg a kitörést (Rendtel & Arlt 2022, Koten et al. 2023, Egal et al. 2023), ami befolyásolta a láthatóságot és a megfigyelés minőségét. Ezen kívül a használt felszerelések skálája - a nagy érzékenységu kameráktól a szabványos megfigyelési eszközökig - jelentősen befolyásolhatja a meteorok észlelését.

6. Diszkusszió

Ebben a dolgozatban a 2022-es Tau Herculidák vizsgálatán keresztül mutattam be egy újszerű módszert a meteorrajok egyállomásos videómegfigyeléseinek elemzésére. Bemutattam a hőtérkép-módszer hatékonyságát, és kiszámítottam a raj radiánspozícióját, populációs indexét és ZHR-jét.

A Tau Herculidák kitörésének újdonsága és ismeretlensége nagy kihívást jelentett. A fejlesztés jelentős része a raj jellemzőinek előzetes ismerete nélkül történt, a záporról szó-

ló új eredményeket a munkám közepén publikálták. A bemutatott algoritmusok további testreszabásához és javításához több adatra van szükség a már ismert, kiszámítható meteorrajokból, mint például a Quadrantidák, Perseidák vagy Geminidák. Már rendelkezésre áll 18 óra felvétel a 2023-as és 32 óra felvétel a 2024-es Perseidák maximumról, valamint 2 óra meteorrajoktól mentes észlelés, mind saját gyűjtésből.

A kutatás során létrehozott, több mint 700 meteorból álló, halvány és gyors meteorokkal benépesített katalógus egyedülálló és értékes adatkészlet. Kiváló tanulóhalmaz lehet gépi tanulási algoritmusokhoz és más mesterséges intelligencia eszközökhöz, amelyeket a meteormegfigyeléshez fejlesztenek. Mivel a kézi azonosítás és a fényességbecslés a legidőigényesebb részei a folyamatnak, a jövőben ezek automatizálása lesz az elsődleges cél. Ez lehetővé teszi majd a módszer széles körű alkalmazását mind a szakemberek, mind a civil szereplők számára.

Mesterséges intelligencia alkalmazása

A pályamunka elkészítése során tudatosan alkalmaztam különböző mesterséges intelligencia alapú eszközöket, amelyek hozzájárultak a kutatási folyamat bizonyos fázisaihoz és a dolgozat megírásához. Az alábbiakban részletezem az eszközöket és a használat módját:

1. ChatGPT⁵ (OpenAI):

- *Python kódfejlesztés:* A ChatGPT-t arra használtam, hogy javaslatokat kérjek Python kódok optimalizálásához és hibajavításhoz. Az eszköz segített a kód struktúrájának letisztázásában és alternatív megoldások kidolgozásában.
- *Nyelvi megfogalmazások:* A dolgozat magyar nyelvű szövegének érthetőbb és letisztultabb megfogalmazásában segített, különösen a bevezető és a módszertani fejezeteknél.
- *Logikus struktúra kialakítása:* A dolgozat felépítésének és tartalomjegyzékének logikusabb szervezése érdekében konzultáltam az eszközzel.

2. Github Copilot⁶:

- *Kódírás:* A Github Copilot segítségével gyorsítottam a Python programkódok megírását. Az eszköz kiegészítései és automatikus javaslatai különösen hasznosak voltak ismétlődő feladatok esetén.

3. DeepL⁷ fordító:

- *Fordítás:* Az dolgozatommal azonos című angol nyelvű BSc szakdolgozatom magyar nyelvre történő fordításához a DeepL fordítót használtam, amely az eredeti szöveghűség megőrzése mellett gyorsította a fordítási folyamatot.

A mesterséges intelligencia eszközöket a dolgozat támogatására és gyorsítására alkalmaztam, azonban minden esetben ellenőriztem az általuk javasolt tartalmat, és biztosítottam, hogy a dolgozat megfeleljen a tudományos követelményeknek.

⁵OpenAI ChatGPT (GPT-4.0, mesterséges intelligencia alapú szöveggenerátor), elérhető: <https://openai.com/chatgpt>.

⁶GitHub Copilot (AI-alapú kódkiegészítő eszköz), elérhető: <https://github.com/features/copilot>.

⁷DeepL Translator (fordítómotor mesterséges intelligencia technológiával), elérhető: <https://www.deepl.com/translator>.

Köszönetnyilvánítás

Ahogy bemutatom ezt a dolgozatot, mélységes hálámat fejezem ki azon személyek felé, akik útmutatása, támogatása és bátorítása felbecsülhetetlen értékű volt.

Hálával tartozom témavezetőimnek, Kiss L. Lászlónak és Sárneczky Krisztiánnak, amiért velem együtt navigáltak feltérképezetlen területeken, és hozzáférést biztosítottak felbecsülhetetlen értékű adataikhoz. Köszönöm a dolgozat megírása közben nyújtott alapos munkátokat!

Barátaimnak és kollégáimnak, Rózsahegyi Mártonnak és Igaz Antalnak köszönettel tartozom a szorgalmas adatgyűjtésért és a végtelen órákig tartó közös videofelvételekért.

Külön köszönet illeti Vinkó Józsefet, akinek a McDonald Obszervatóriumba induló expedíció megszervezésében nyújtott segítsége kulcsfontosságú volt. A meteorok párosítási algoritmusának megalkotása és a párosításos radiánsmeghatározási módszerének kidolgozása alapvető fontosságú volt a kutatásom szempontjából.

Belső Zoltán barátomnak köszönöm, hogy megosztotta velem Python kódolás és asztrofotó stacking terén szerzett tudását.

Nagyrabecsülésemet fejezem ki kutatótársaimnak, Deme Líviának, Egei Nórának és Györgyey-Ries Juditnak nagylelkű támogatásukért és segítségükért.

Köszönöm bírálóimnak, Asztalos Balázsnak és Deme Barnabásnak, hogy az ELTE Csillagász Kari TDK során elolvasták dolgozatomat, végighallgatták előadásomat és támogató kérdéseket tettek fel, valamint megjegyzéseikkel segítették munkámat és javították a dolgozatot.

Hálás vagyok menyasszonyom, Pusztai Virág kitartó támogatásáért, aki akkor is segített motivációt keríteni, amikor úgy éreztem, egyetlen billentyű leütése is leküzdhetetlen akadály.

Köszönöm a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet demonstrátori programjának anyagi támogatását. A kutatás a Kozmikus hatások és kockázatok c. GINOP-2.3.2-15-2016-00003 pályázat, valamint a NeoDetect szerződés támogatásával tudott megvalósulni.

Budapest, 2025. január 8.

Hivatkozások

- Anghel, S., Nedelcu, D. A., Birlan, M. & Boaca, I. (2023), Single-station meteor detection filtering using machine learning on moroi data', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **518**(2), 2810–2824.
- Asher, D. & Arlt, R. (2000), 'Proc. int. meteor conf.', *Proc. Int. Meteor Conf.* .
- Belkovich, O. & Ishmukhametova, M. (1997), Comparison of two methods of visual meteor observations', *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **25**, 79–84.
- Bianchi, L. et al. (2007), Continuity and change in the aristotelian tradition', *The Cambridge companion to Renaissance philosophy* pp. 49–71.
- Boehnhardt, H., Holdstock, S., Hainaut, O., Tozzi, G. P., Benetti, S. & Licandro, J. (2002), 73p/schwassmann-wachmann 3—one orbit after break-up: Search for fragments, in *Cosmetary Science after Hale-Bopp: Volume 2 Proceedings of IAU Colloquium 186* 21–25 January 2002, Tenerife, Spain', Springer, pp. 131–139.
- Boehnhardt, H., Käuffl, H., Goudfrooij, P., Storm, J., Manfroid, J. & Reinsch, K. (1996), The break-up of periodic comet schwassmann-wachmann 3: image documents from la silla telescopes.', *Messenger* **84**.
- Bronshten, V. A. (1983), *Physics of Meteoric Phenomena*, Springer Dordrecht.
- Burke, J. G. (1991), *Cosmic debris: Meteorites in history*, Univ of California Press.
- Campbell-Brown, M. (2004), 'Optical observations of meteors', *Earth, Moon, and Planets* **95**, 521–531.
- Campbell-Brown, M. D. & Koschny, D. (2004), 'Model of the ablation of faint meteors', *Astronomy & Astrophysics* **418**(2), 751–758.
- Campbell, M., Brown, P., LeBlanc, A., Hawkes, R., Jones, J., Worden, S. & Correll, R. (2000), 'Image-intensified video results from the 1998 leonid shower: I. atmospheric trajectories and physical structure', *Meteoritics & Planetary Science* **35**(6), 1259–1267.
- Carusi, A., Kresák, L. & Valsecchi, G. (1981), 'Perturbations by jupiter of a chain of objects moving in the orbit of comet oterma', *Astronomy and Astrophysics, vol. 99, no. 2, June 1981, p. 262-269.* **99**, 262–269.

- Carusi, A., Kresák, L. & Valsecchi, G. (1982), ‘Orbital patterns of interplanetary objects at close encounters with jupiter’, *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin*, vol. 33, no. 3, 1982, p. 141-150. **33**, 141–150.
- Cepplecha, Z., Borovička, J., Elford, W. G., ReVelle, D. O., Hawkes, R. L., Porubčan, V. & Šimek, M. (1998), ‘Meteor phenomena and bodies’, *Space Science Reviews* **84**, 327–471.
- Chladni, E. (1797), ‘Fortsetzung der bermerkungen über feuerkugeln und niedergefallene masses’, *Magazin für den neuesten Zustand der Naturkunde* **1**, 17–30.
- Crovisier, J., Biver, N., Bockelee-Morvan, D., Colom, P., Gerard, E., Jorda, L. & Rauer, H. (1995), Comet 73p/schwassmann-wachmann 3’, **6227**, 1.
- Crovisier, J., Bockelée-Morvan, D., Gerard, E., Rauer, H., Biver, N., Colom, P. & Jorda, L. (1996), ‘What happened to comet 73p/schwassmann-wachmann 3?’, *Astronomy and Astrophysics*, v. 310, p. L17-L20 **310**, L17–L20.
- Czegka, W. (2000), Lichenberg, benzenberg, brandes, and their meteor height determination in 1798-1800: An empirical approach to solove the meteorite enigma’, *Meteoritics and Planetary Science Supplement* **35**, A45.
- DiSanti, M., Anderson, W., Villanueva, G., Bonev, B., Magee-Sauer, K., Gibb, E. & Mumma, M. (2007), Depleted carbon monoxide in fragment c of the jupiter-family comet 73p/schwassmann-wachmann 3’, *The Astrophysical Journal* **661**(1), L101.
- Dohnanyi, J. (1970), ‘On the origin and distribution of meteoroids’, *Journal of Geophysical Research* **75**(17), 3468–3493.
- Dolinsky, P. & Aales, N. (2023), The perseid and tau herculid outburst captured by radio stations in slovakia, in ‘Proceedings of the International Meteor Conference 2022, September 29–October 2, Poroszló, Hungary’, International Meteor Organization, pp. 138–140.
- D’Orazio, M. (2007), ‘Meteorite records in the ancient greek and latin literature: between history and myth’, *Geological Society, London, Special Publications* **273**(1), 215–225.
- Drummond, J. D. (1981), ‘A test of comet and meteor shower associations’, *Icarus* **45**(3), 545–553.

- Duffy, A. G., Hawkes, R. & Jones, J. (1987), The determination of shower meteor parameters from single station observations', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **228**(1), 55–75.
- Egal, A., Wiegert, P. A., Brown, P. G. & Vida, D. (2023), 'Modeling the 2022 τ -herculid outburst', *The Astrophysical Journal* **949**(2), 96.
- Gural, P. S., Jenniskens, P. M. & Varros, G. (2005), 'Results from the aim-it meteor tracking system', *Modern Meteor Science An Interdisciplinary View* pp. 541–552.
- Gyssens, M. (2000), Letters to wgn: On the leonid observations made by alexander von humboldt from venezuela; antonio martinez picar, october 24, 2000', *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **28**, 190.
- Halley, E. (1705), *A Synopsis of the Astronomy of Comets... Translated from the original, printed at Oxford*, John Senex.
- Halley, E. (1714), 'Iv. an account of several extraordinary meteors or lights in the sky. by dr. edmund halley, savilian professor of geometry at oxon, and secretary to the royal-society', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **29**(341), 159–164.
- Hankey, M. (2021), 'AllSkyCams - Next Generation Camera Systems'.
URL: <https://www.allskycams.com>
- Hankins, T. L. (1985), *Science and the Enlightenment*, Cambridge University Press.
- Hawkes, R., Bussey, J., Macphee, S., Pollock, C. & Taggart, L. (2001), Techniques for high resolution meteor light curve investigations, in 'Meteoroids 2001 Conference', Vol. 495, pp. 281–286.
- Hey, J. S. & Stewart, G. (1947), 'Radar observations of meteors', *Proceedings of the Physical Society* **59**(5), 858.
- Horii, S., Watanabe, J.-i. & Sato, M. (2008), 'Meteor showers originated from 73p/schwassmann–wachmann', *Advances in meteoroid and meteor science* pp. 85–89.
- Hughes, D. (1986), The relationship between comets and meteoroid streams, in 'Asteroids, Comets, Meteors II', pp. 503–519.
- Hughes, D. W. (1982), The history of meteors and meteor showers', *Vistas in Astronomy* **26**, 325–345.

- Jacchia, L. G., Verniani, F. & Briggs, R. E. (1965), ‘An analysis of the atmospheric trajectories of 413 precisely reduced photographic meteors’, *SAO Special Report* **175**.
- Jenniskens, P. (1994), ‘Meteor stream activity i. the annual streams’, *Astronomy and Astrophysics, Vol. 287, p. 990-1013 (1994)* **287**, 990–1013.
- Jenniskens, P. (1995), ‘Meteor stream activity. 2: Meteor outbursts’, *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361), vol. 295, no. 1, p. 206-235* **295**, 206–235.
- Jenniskens, P. (1998), ‘On the dynamics of meteoroid streams’, *Earth, planets and space* **50**, 555–567.
- Jenniskens, P. (2008), ‘Mostly dormant comets and their disintegration into meteoroid streams: A review’, *Advances in Meteoroid and Meteor Science* pp. 505–520.
- Jenniskens, P. (2017), ‘Meteor showers in review’, *Planetary and Space Science* **143**, 116–124.
- Jenniskens, P. (2022*a*), ‘2022 tau-herculids outburst observed by cams’, *eMeteorNews* **7**(4), 230–231.
- Jenniskens, P. (2022*b*), ‘Anticipating a meteor outburst: global cams video network detects first 2022 tau herculids’, *eMeteorNews* **7**(4), 228–229.
- Jenniskens, P., Baggaley, J., Crumpton, I., Aldous, P., Pokorny, P., Janches, D., Gural, P. S., Samuels, D., Albers, J., Howell, A. et al. (2018), ‘A survey of southern hemisphere meteor showers’, *Planetary and Space Science* **154**, 21–29.
- Jenniskens, P., Gural, P., Dynneson, L., Grigsby, B., Newman, K., Borden, M., Koop, M. & Holman, D. (2011), ‘Cams: Cameras for allsky meteor surveillance to establish minor meteor showers’, *Icarus* **216**(1), 40–61.
- Jenniskens, P. M. M. (2006), *Meteor showers and their parent comets*, Cambridge University Press.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Albers, J., Gural, P., Haberman, B., Holman, D., Morales, R., Grigsby, B., Samuels, D. & Johannink, C. (2016), ‘The established meteor showers as observed by cams’, *Icarus* **266**, 331–354.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Gural, P., Albers, J., Haberman, B., Johnson, B., Morales, R., Grigsby, B., Samuels, D. & Johannink, C. (2016), ‘Cams newly detected meteor showers and the sporadic background’, *Icarus* **266**, 384–409.

- Jenniskens, P., Phillips, M., Morales, R. & Grigsby, B. (2011), Tau herculids', *Central Bureau Electronic Telegrams* **2817**, 1.
- Kac, J. & Ocaña, F. (2023), Observation of the 2022 tau-herculid outburst from arizona, in 'Proceedings of the International Meteor Conference 2022, September 29–October 2, Poroszló, Hungary', International Meteor Organization, pp. 127–130.
- Kandeeapan, M., Ciocan, C., Millet, M., Bouyer, M., Cassagne, A. & Lacassagne, L. (2022), Fast meteor detection toolbox, in 'Workshop AFF3CT'.
- Kiss, L. L., Sárneczky, K., Igaz, A., Rózsahegyi, M. & Szabó, N. O. (2023), Highway to heaven: lessons from a tau herculid expedition to texas and beyond, in 'Proceedings of the International Meteor Conference 2022, September 29–October 2, Poroszló, Hungary', International Meteor Organization, pp. 45–47.
- Koschack, R. & Rendtel, J. (1990*a*), Determination of spatial number density and mass index from visual meteor observations (i).', *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **18**, 44–58.
- Koschack, R. & Rendtel, J. (1990*b*), Determination of spatial number density and mass index from visual meteor observations (ii).', *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **18**, 119–140.
- Koten, P., Shrbený, L., Spurný, P., Borovička, J., Štork, R., Henych, T., Vojáček, V. & Mánek, J. (2023), 'τ herculid meteor shower in the night of 30/31 may 2022 and the meteoroid properties', **675**, A70.
- Levison, H. F. (1996), Comet taxonomy, in *Completing the Inventory of the Solar System*', Vol. 107, pp. 173–191.
- Lindblad, B. A., Neslušan, L., Porubčan, V. & Svoreň, J. (2003), 'Iau meteor database of photographic orbits–version 2003', *Earth, Moon, and Planets* **93**, 249–260.
- Lüthen, H., Arlt, R. & Jäger, M. (2001), The disintegrating comet 73p/schwassmann-wachmann 3 and its meteors', *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **29**, 15–28.
- Martin, C. (2011), *Renaissance meteorology*, JHU Press.

- McIntosh, B. A. (1989), Debris from comets: The evolution of meteor streams, *in* ‘International Astronomical Union Colloquium’, Vol. 116, Cambridge University Press, pp. 557–591.
- Millman, P. M. (1980), One hundred and fifteen years of meteor spectroscopy, *in* ‘Symposium-International Astronomical Union’, Vol. 90, Cambridge University Press, pp. 121–128.
- Miskotte, K. (2022), ‘A meteor outburst caused by dust from comet 73p/schwassmann-wachmann: the tau herculids, a visual analysis’, *eMeteorNews* **7**(5), 307–312.
- Molau, S. (1994), Movie: Meteor observation with video equipment, *in* ‘Proceedings of the International Meteor Conference, 12th IMC, Puimichel, France, 1993’, pp. 71–75.
- Molau, S. (1995), Movie-analysis of video meteors, *in* ‘Proceedings of the International Meteor Conference, 13th IMC, Belogradchik, Bulgaria, 1994’.
- Molau, S. (1999), The meteor detection software metrec, *in* ‘Proceedings of the International Meteor Conference, 17th IMC, Stara Lesna, Slovakia, 1998’, pp. 9–16.
- Molau, S. (2001), The akm video meteor network, *in* ‘Meteoroids 2001 Conference’, Vol. 495, pp. 315–318.
- Molau, S. (2015), Population index reloaded, *in* ‘International Meteor Conference Mistelbach, Austria’, p. 11.
- Molau, S. & Arlt, R. (1997), ‘Meteor shower radiant positions and structures as determined from single station video observations’, *Planetary and space science* **45**(7), 857–864.
- Ogawa, H. & Sugimoto, H. (2022), ‘A meteor outburst of the τ -herculids 2022 by world-wide radio meteor observations’, *eMeteorNews* **7**(4), 232–235.
- Olsson-Steel, D. (1986), The origin of the sporadic meteoroid component’, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **219**(1), 47–73.
- Oppenheim, A. L. (2013), *Ancient Mesopotamia: portrait of a dead civilization*, University of Chicago Press.
- Popova, O. P., Jenniskens, P., Emel’yanenko, V., Kartashova, A., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S., Shuvalov, V., Rybnov, Y., Dudorov, A., Grokhovsky, V. I. et al. (2013), Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization’, *Science* **342**(6162), 1069–1073.

- Pringle, J. (1759), ‘Xxvii. some remarks upon the several accounts of the fiery meteor (which appeared on sunday the 26th of november, 1758), and upon other such bodies; by john pringle, mdf r s’, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **51**, 259–274.
- Quanzhi, Y. & Jérémie, V. (2022), The 2022 encounter of the outburst material from comet 73p/schwassmann-wachmann 3’, *MNRAS* **515**(1), L45–L49.
- Rao, J. (2021), ‘Will Comet 73P/Schwassman-Wachmann 3 produce a meteor outburst in 2022?’, *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **49**(1), 3–14.
- Rendtel, J. & Arlt, R. (2022), Tau herculids 2022: Rate, number density, population index and geometrical effects from visual data’, *arXiv preprint arXiv:2209.12297*.
- Richter, J. (1999), ‘Visdat: a database system for visual meteor observations.’, *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **27**, 2–4.
- Roggemans, P. (1988), The visual meteor database (vmdb).’, *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **16**, 179–186.
- Sato, M. (2003), ‘An investigation into the 1998 and 1999 giacobinids by meteoroid trajectory modeling’, *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **31**, 59–63.
- Schaffer, S. (2018), Late enlightenment crises of facts: mesmerism and meteorites’, *Configurations* **26**(2), 119–148.
- Schmitt, S. (2004), ‘Meteor shower radiant calculator’.
URL: http://www.convertalot.com/meteor_shower_radiant_calculator.html
- Sekanina, Z. (1970a), Statistical model of meteor streams i. analysis of the model’, *Icarus* **13**(3), 459–474.
- Sekanina, Z. (1970b), Statistical model of meteor streams ii. major showers’, *Icarus* **13**(3), 475–493.
- Sitko, M. L., Lisse, C. M., Kelley, M. S., Polomski, E. F., Lynch, D. K., Russell, R. W., Kimes, R. L., Whitney, B. A., Wolff, M. J. & Harker, D. E. (2011), ‘Infrared spectroscopy of comet 73p/schwassmann-wachmann 3 using the spitzer space telescope’, *The Astronomical Journal* **142**(3), 80.

- Slansky, P. (2023), Meteor observation in 4k/uhd – opportunities, obstacles and missing links, *in* ‘Proceedings of the International Meteor Conference 2022, September 29–October 2, Poroszló, Hungary’, International Meteor Organization, pp. 112–115.
- Slansky, P. C. (2021), ‘The Fruits of Failure, Frustration and Fortune - Two years in an amateur meteor observer’s life’, *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **49**(5), 131–133.
- Southworth, R. & Hawkins, G. (1963), Statistics of meteor streams’, *Smithsonian Contributions to Astrophysics, Vol. 7, p. 261-285* **7**, 261–285.
- Spalding, J. & Hemenway, C. L. (1961), ‘Meteor observations with an image orthicon i.’, *The Astronomical Journal* **66**, 54.
- Szabó, N. O., Igaz, A., Kiss, L. L., Rózsahegyi, M., Sárneczky, K., Csák, B., Deme, L. & Vinkó, J. (2023), Tau-herculids 2022 from the mcdonald observatory, texas - a progress report, *in* ‘Proceedings of the International Meteor Conference 2022, September 29–October 2, Poroszló, Hungary’, International Meteor Organization, pp. 120–123.
- Szabó, N. O., Igaz, A., Rózsahegyi, M., Sárneczky, K., Csák, B., Deme, L., Vinkó, J. & Kiss, L. L. (2024), A new approach to analyze single-site video meteor observatoins: A tau her 2022 case study, *in* ‘Proceedings of the International Meteor Conference 2023, August 31–September 2, Reru, Belgium’, International Meteor Organization, pp. 135–137.
- Toth, I., Lamy, P. & Weaver, H. (2005), ‘Hubble space telescope observations of the nucleus fragment 73p/schwassmann–wachmann 3-c’, *Icarus* **178**(1), 235–247.
- Tóth, J., Vaubaillon, J., Zander, F., Buttsworth, D., Leohle, S., Kaniansky, S., Paulech, T., de Fonseca, P., Gabor, P. et al. (2023), Tau herculids 2022 from air and ground, *in* ‘Proceedings of the International Meteor Conference 2022, September 29–October 2, Poroszló, Hungary’, International Meteor Organization, pp. 116–117.
- Vaubaillon, J., Colas, F. & Jorda, L. (2005*a*), ‘A new method to predict meteor showers-i. description of the model’, *Astronomy & Astrophysics* **439**(2), 751–760.
- Vaubaillon, J., Colas, F. & Jorda, L. (2005*b*), ‘A new method to predict meteor showers-ii. application to the leonids’, *Astronomy & Astrophysics* **439**(2), 761–770.

- Vaubailion, J., Da Fonseca, P., Bouley, F., Younes, Y., Fasola, G., Baillié, K., Desmars, J., Bouquillon, S. & Amans, J.-P. (2022), The “mobile observation of meteor”(momet) device’, *Experimental Astronomy* **54**(1), 1–22.
- Vaubailion, J. J. & Reach, W. T. (2010), Spitzer space telescope observations and the particle size distribution of comet 73p/schwassmann–wachmann 3’, *The Astronomical Journal* **139**(4), 1491.
- Vaubailion, J., Loir, C., Ciocan, C., Kandeepan, M., Millet, M., Cassagne, A., Lacassagne, L., de Fonseca, P., Zander, F., Buttsworth, D. et al. (2023), ‘A 2022 τ -herculid meteor cluster from an airborne experiment: automated detection, characterization, and consequences for meteoroids’, *Astronomy & Astrophysics* **670**, A86.
- Vida, D. & Segon, D. (2022), ‘Tau Herculid Meteors’, *Central Bureau for Astronomical Telegrams* **5126**.
- Vida, D., Šegon, D., Gural, P. S., Brown, P. G., McIntyre, M. J., Dijkema, T. J., Pavletić, L., Kukić, P., Mazur, M. J., Eschman, P. et al. (2021), The global meteor network–methodology and first results’, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **506**(4), 5046–5074.
- Vida, D., Zubović, D., Šegon, D., Gural, P. & Cupec, R. (2016), ‘Open-source meteor detection software for low-cost single-board computers’, *Proceedings of the IMC2016, Egmond, The Netherlands, u postupku objave*.
- Villanueva, G. L., Bonev, B. P., Mumma, M. J., Magee-Sauer, K., DiSanti, M. A., Salyk, C. & Blake, G. A. (2006), The volatile composition of the split ecliptic comet 73p/schwassmann-wachmann 3: A comparison of fragments c and b’, *The Astrophysical Journal* **650**(1), L87.
- Vítek, S. & Nasyrova, M. (2019), ‘Fast meteor tracking in noisy video sequences’, *Astronomische Nachrichten* **340**(7), 646–651.
- Weaver, H. A., Lisse, C., Mutchler, M., Lamy, P., Toth, I. & Reach, W. (2006), Hubble space telescope investigation of the disintegration of 73p/schwassmann-wachmann 3, in ‘AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts# 38’, Vol. 38, pp. 06–02.
- Weiland, T. (2022), ‘Analysis of the unusual outburst of the tau-herculids in 2022, observed from Arizona, USA’, *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **50**(3-4), 105–108.

- Wetherill, G. W. (1974), Solar system sources of meteorites and large meteoroids', *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **2**(1), 303–331.
- Whipple, F. L. (1938), 'Photographic meteor studies, i', *Proceedings of the American Philosophical Society* pp. 499–548.
- Whipple, F. L. (1940a), 'Photographic meteor studies, ii. non-linear trails', *Proceedings of the American Philosophical Society* pp. 275–290.
- Whipple, F. L. (1940b), 'Photographic meteor studies. iii. the taurid shower', *Proceedings of the American Philosophical Society* pp. 711–745.
- Whipple, F. L. (1947), 'Photographic meteor studies. iv. the geminid shower', *Proceedings of the American Philosophical Society* pp. 189–200.
- Whipple, F. L. & Wright, F. W. (1957), 'Methods for the study of shower radiants from photographic meteor trails', *Smithsonian Contribution to Astrophysics, Vol. 1, p. 239-243* **1**, 239–243.
- Wiegert, P., Brown, P., Vaubaillon, J. & Schijns, H. (2005), The τ herculid meteor shower and comet 73p/schwassmann-wachmann 3', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **361**(2), 638–644.
- Wiegert, P., Vaubaillon, J. & Campbell-Brown, M. (2009), 'A dynamical model of the sporadic meteoroid complex', *Icarus* **201**(1), 295–310.
- Ye, Q. & Vaubaillon, J. (2022), The 2022 encounter of the outburst material from comet 73p/schwassmann–wachmann 3', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* **515**(1), L45–L49.
- Zwicky, F. (1946), 'On the possibility of earth-launched meteors', *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **58**(343), 260.
- Zwicky, F. (1947), 'Research with rockets', *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **59**(347), 64–73.
- Zwicky, F. (1953), 'Artificial meteors', *Engineering and Science* **16**(4), 20–22.

Függelék: Saját eredmények

Saját megoldott tudományos kérdés:

- A Tau Herculidák meteorraj 2022-es kitörésének radiáns- és ZHR-meghatározása egy egyedi hőtérképes módszerrel.

Saját elvégzett munka:

- Meteorok azonosítása vizuális módszerrel előre felvett videókon három másik emberrel szimultán. 796 meteor részletes katalógusának létrehozása.
- A 626 tau herculida meteor videófelvevételeiből asztrometriai mérésekre alkalmas FITS fájlok készítése, a meteorok kezdő- és végpontkoordinátáinak kimérése.
- A tau herculida meteorok fényességének megbecslése vizuális módszerrel a témavezetőimmal szimultán.
- A hőtérkép módszer kidolgozása és alkalmazása a Tau Herculidák raj radiánsának meghatározására, az eredmények ábrázolása. Gömbháromszögtani módszerek segítségével a radiáns horizont fölötti magasságának kiszámítása az észlelési helyről.
- A meteorok fényességeloszlásának ábrázolása és illesztés segítségével a raj populációs indexének meghatározása.
- A 2022-es Tau Herculidák kitörés ZHR-jének kiszámítása és a raj maximumának meghatározása.

Alkalmazott módszerek:

- Vizuális meteorészlelés és fényességbecslés az adatsor előállításához.
- Hőtérképes vizualizáció a radiáns pontos helyének meghatározására.
- Kumulatív hisztogram alapján végzett populációs index-számítás.
- Gömbháromszögtani alkalmazás a ZHR kiszámításához.

Saját eredmények:

- A 2022-es Tau Herculidák radiánsának koordinátái a május 30-i éjszakán $\alpha = (207,00 \pm 2,11)^\circ$ és $\delta = (+23,00 \pm 5,94)^\circ$. Május 31-én a koordináták $\alpha = (209,71 \pm 1,01)^\circ$ és $\delta = (+27,73 \pm 0,07)^\circ$.
- A 2022-es Tau Herculidák kitörés populációs indexe $r = 2,51 \pm 0,35$.
- A 2022-es Tau Herculidák kitörés ZHR-je $52,54 \pm 2,45$, a kitörés maximuma 2022. május 31-én 04:29 UT-kor következett be.