

4. félévi beszámoló

Matécsa Barbara (matecsa.barbara@csfk.org)

Csillagászat és Űrfizika PhD program

Témavezető: Csabai István (ELTE), Kovács András (CSFK)

A dolgozat címe: A kozmikus háló feltérképezése: a szimulációktól
a legmélyebb galaxis felmérésekig

Bevezetés

A kutatási téma leírása: A modern kozmológia egyik átfogó célja a kozmikus háttérsugárzás (CMB) anizotrópiákban látható apró sűrűségi fluktuációk rekonstruálása, és hogyan nőnek a bonyolult kozmikus hálózattá. A Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter) kozmológiai modell kiváló magyarázó erejét mutatta be a különböző kozmikus skálákon és korszakokban, és egy biztonságos történetet mesél el egy olyan univerzumból, amely jelenleg túlnyomórészt sötét anyaggal és sötét energiával van tele. Mégis, ez a magyarázat nem teljesen kielégítő, mert a sötét összetevők valódi természete továbbra is rejtély.

Ebben a doktori projektben azon dolgozom, hogy kifejlesszek új eszközöket a rejtélyes sötét energiakomponens megértéséhez a legmodernebb galaxis- és kvazár-adatkészletek felhasználásával. Megvizsgálom a szerkezet növekedési rátáját extrém környezetekben, ahol a QSO-k által nyomkövetett sűrűségi csúcsok találhatók, valamint a sötét és üres voidok területén. Különösen részletesen tanulmányozzuk, hogyan nyújtja ki a sötét energia a legnagyobb kozmikus szuperhalmazokat és a hatalmas kozmikus voidokat, mintegy 300 millió fényév terjedelemben, amely bizonyítékokat szolgáltat másodlagos forró és hideg foltok formájában a CMB hőmérséklet/lencse anizotrópia térképein.

Megfontolunk egy felmerülő új hipotézist is, miszerint a közelmúltban bejelentett kozmológiai anomáliák, amelyek a tágulás és a szerkezetenövekedés finom egyensúlyáról szólnak, magyarázhatók lennének, ha a Univerzum tágulása inhomogén lenne, szemben a koncordancia modell alapvető feltevésével.

A tervezett 4 éves program fő célja, döntő kereszt-korrelációs mérések végzése a szuperstruktúrák és a CMB között még nem feltárt, kulcsfontosságú vöröseltolódási tartományokban, ahol a sötét energia standard és alternatív modellei a legjelentősebben különböznek ($z > 1$). Az SDSS/BOSS, Pan-STARRS és DES felmérésekből származó előzetes eredmények az ELTE és a CSFK-val együttműködő kozmológiai kutatócsoportunkat erős pozícióba helyezik a tervezett új LSST-DESC, Euclid, J-PAS és WEAVE-QSO elemzések vezetéséhez. Ezekkel az új eszközökkel a kozmikus hálózatban megállapítjuk, hogy valamilyen eddig ismeretlen fizikai hatások vagy szisztematikus torzulások bonyolítják-e a képet. Akárhogyis lesz mindenképpen új ismereteket szerezünk az Univerzumból a legnagyobb skálákon.

A fő kutatási cél: Az MTA-CSFK Lendület Nagyskálás Szerkezet projekt keretében a következő három fő kozmológiai előtérhatás szimulált és megfigyelési jellemzésére fogok összpontosítani a CMB-ben, magas vöröseltolódású galaxis- és QSO-adatkészletek felhasználásával történő keresztkorrelációval. A legnagyobb kozmikus struktúrák felhasználásával ezek a kozmológiai hatások egyedülálló lehetőséget kínálnak mindhárom fő hatás tanulmányozására a kozmikus energia hatásában, különös tekintettel a legextrémebb kozmikus környezetekre:

1. Gravitációs lencse hatás: többnyire a sötét anyag természetét vizsgálja nem Gaussi CMB térkép torzítások segítségével.
2. Integrált Sachs-Wolfe effektus (ISW): a sötét energia tulajdonságait vizsgálja a legnagyobb megfigyelhető skálákon a CMB-ben.
3. Termális Sunyaev-Zeldovich effektus (tSZ): a barionos gáz nyomását vizsgálja voidokban és halmazokban, asztrofizikai hatásokat tesztelve.

Az előző három félévben elért kutatási eredmények összегzése

Az első félévben a kvazárok spektrumának vizuális elemzésével kezdtem, oktatóvideók és szakirodalm segítségével, különösen a Lyman- α erdő analízis különböző módszereire fókuszálva. Céлом egy szimulált kvazárkatalógussal való munka a LyaCoLoRe szoftvercsomag segítségével, amely a CoLoRe (Cosmological Lofty Realization) programra épül. Ennek kapcsán elkezdtem a szimulációkhoz szükséges kódok használatát elsajátítani, valamint egyszerű tesztfuttatásokat végeztem. A CoLoRe egy nyílt forráskódú, párhuzamosított C program, amely szintetikus kozmológiai felmérések generálására alkalmas, támogatja a lognormális mezőket, valamint első- és másodrendű Lagrange-féle perturbációelméletet. Szimulál galaxiseloszlásokat, gravitációs lencsézést, ISW effektust és Lyman- α vonalakat is. A félév végén elkezdtem a REVOLVER void- és szuperhalmaz-kereső program tanulmányozását.

A második félévben a REVOLVER (REal-space VOid Locations from surVEy Reconstruction) Python-alapú void- és szuperhalmaz-kereső kóddal dolgoztam, amely két módszert alkalmaz: a Voronoi tessellációra épülő ZOBOV algoritmust és a voxel alapú megközelítést. A REVOLVER-rel generált void katalógusokat stacking mérésekhez használtam, különböző vöröseltolódás-tartományokban és tömeghatárok mellett, témavezetőm korábban írt kódjának segítségével. Egy teszt sorozaton dolgoztam, amelyben különböző tömegtartományokra végeztem el a void-azonosítást és az eredmények kiértékelését.

A harmadik félévben a Gower Street szimulációkkal dolgoztam, melyek 800 teljes éggömbre kiterjedő n-test szimulációt tartalmaznak, az ω CDM modellen belül változó kozmológiai paraméterekkel ($\Omega_m, \sigma_8, n_s, h, \Omega_b h^2, \omega, m_\nu$), PKDGRAV3 kóddal előállítva. A lightcone fájlokon egy 2D void kereső algoritmust futtattam, amely kivetített galaxistérképek és simított kontrasztterképek alapján azonosítja az alacsony sűrűségű tartományokat. A voidokat pozíció, sugár és sűrűségjellemzők szerint mentettem. Ezt követően egy stacking eljárással az ISW effektus hőmérsékletprofilját számoltam ki a void katalógus alapján, céloom a szimulációk közötti statisztikai mintázatok feltárása. Továbbá egy hónapos Erasmus+ úton vettem részt Tenerifén, az Instituto de Astrofísica de Canarias intézetében.

Itt a kinetikus Szunyaev-Zeldovich (kSZ) effektust vizsgáltam, amely a CMB fotonok inverz Compton-szórásával kapcsolatos spektrális torzulásra vonatkozik. Az AGORA szimulációk térképeit használtam, és a szimulált galaxis katalóguson a REVOLVER void kereső kódot alkalmaztam, amelyet már korábban is használtam.

Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

Folytattam a munkát a Gower Street szimulációs adatbázissal, amelyen már az előző félévben is dolgoztam. Az eddigi kutatások általában csak egy szimulációval mérik össze a void adatokat. Ez csak azt engedi megállapítani, hogy a jel kisebb vagy nagyobb mint a standard LCDM. Ez azonban nem teszi lehetővé más modellek tesztelését vagy a paraméterkorlátozások megállapítását. A Gower Street előnye, hogy több mint 800 különböző szimuláció áll rendelkezésre, így sokkal részletesebb vizsgálatokat lehet végezni.

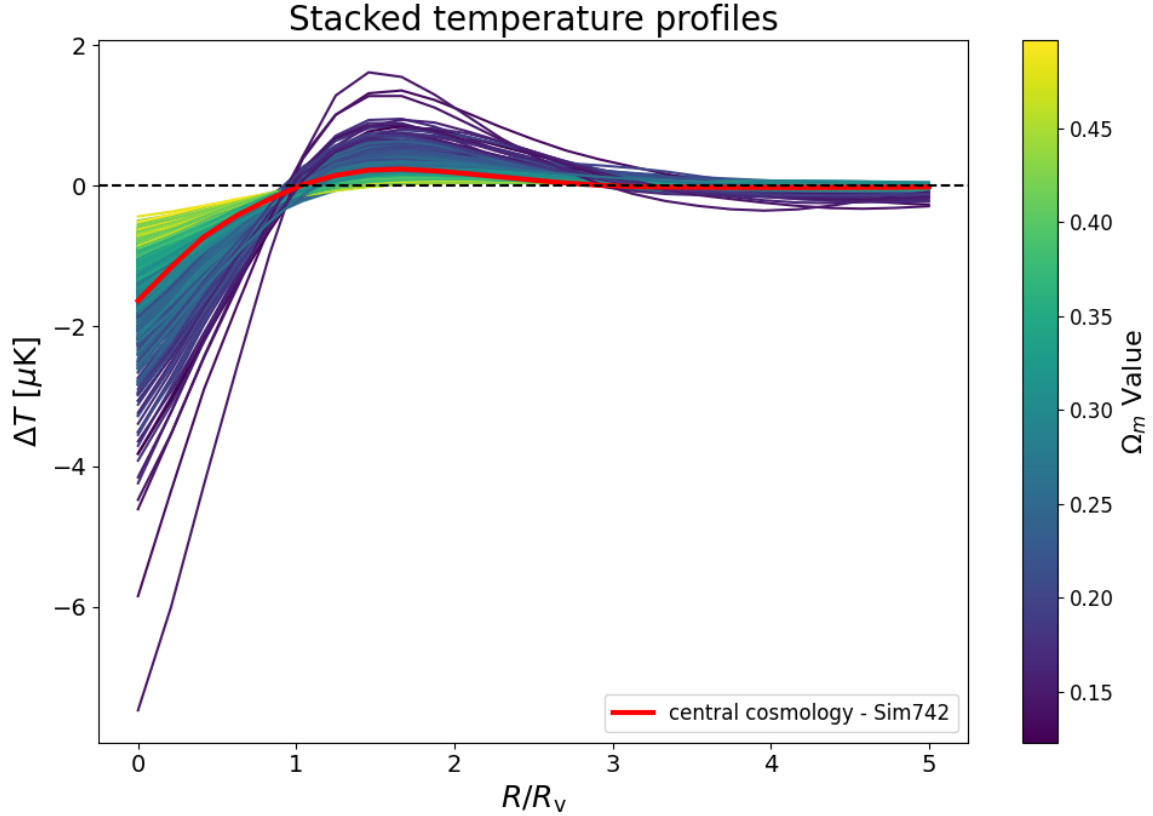
A félév során sikerült az összes, mintegy közel 800 teljes éggömbre kiterjedő szimulációra lefuttatni a 2D void kereső algoritmust, valamint az ISW stacking eljárást. Ez lehetővé tette, hogy egységes módon feldolgozott void katalógusokat és azokhoz tartozó hőmérsékleti profilokat állítsak elő, melyek később statisztikai összehasonlításra és mintázatok keresésére is alkalmasak lesznek.

Ábrázoltam az összes körülbelül 800 szimulációra a futtatásaim eredményét. Az 1. ábra a stacking eljárással kapott hőmérsékletprofilokat mutatja különböző kozmológiai modellekre. A színezés az Ω_m értékét jelöli. A piros görbe a standard (Planck) kozmológiát reprezentálja, míg a többi szimuláció ettől való eltéréseket mutat. Jól látszik, hogy hogyan változik a jelalak az anyagsűrűség függvényében.

A 2. ábrán kiemeltem 5 szimulációt aminek elég extrém kozmológiai paraméter értékei vannak. Jól látható, hogy a többi szimuláció ezek közt helyezkedik el, ahogy ezt az 1. ábrán is látszik. Ez az ábra segít az extrém esetek összehasonlításában.

Ezen öt szimulációnak ábrázoltam a void méreteinek eloszlását (lásd 3. ábra). Az eltérő Ω_m értékek jól láthatóan befolyásolják a void struktúrák tipikus méreteit.

A 4. ábrán az 1. ábrán látható profiloknak vettem a minimum értékeit és ezt ábrázoltam az Ω_m és w függvényében. Ez az ábra jól szemlélteti az eloszlásukat.

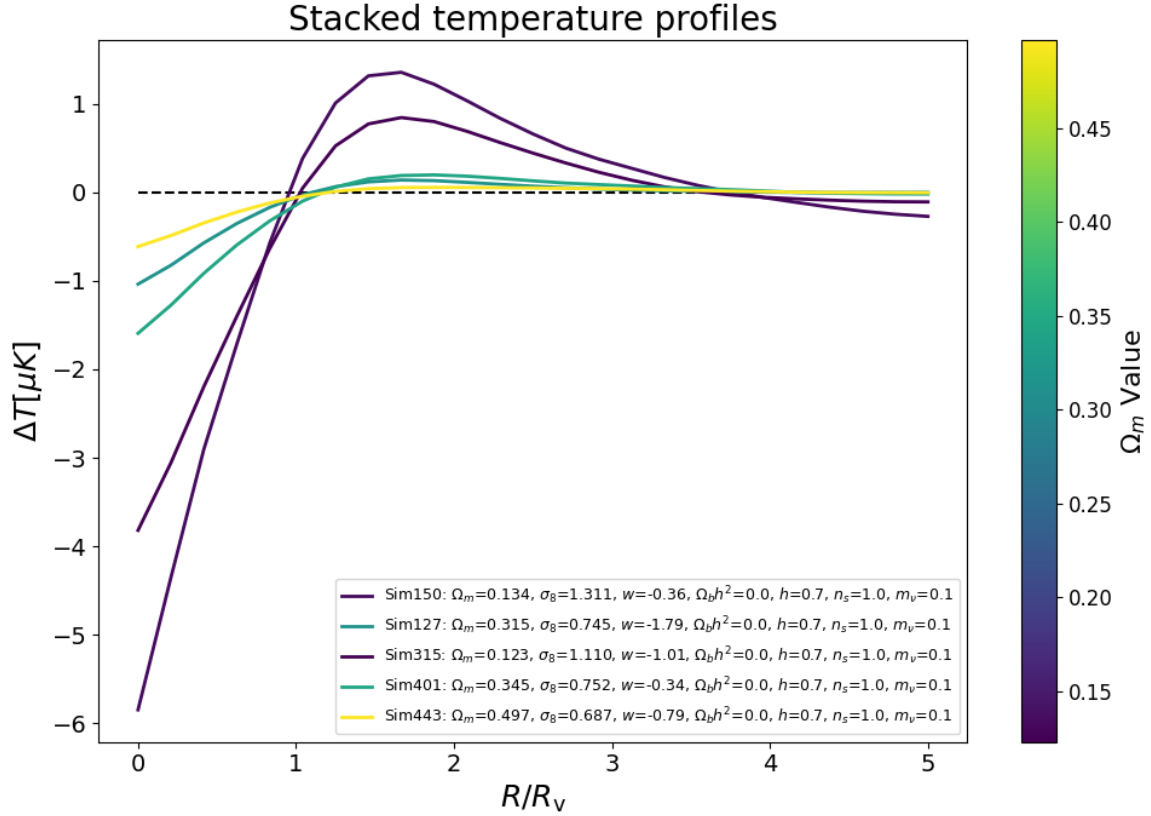


1. ábra. Különböző kozmológiájú hőmérséklet profilok a stacking kódból. A színskala a Ω_m értékét mutatja. Az összes körülbelül 800 szimuláció. A piros profil a centrális kozmológiához tartozó érték.

Emellett elkezdtem dolgozni az Euclid Large Mock (ELM) katalógus adataival is, amely egy nagyméretű, szimulált galaxiskatalógus az ESA Euclid űrtávcső tudományos céljainak támogatására. Az ELM célja, hogy olyan realisztikus galaxis- és anyageloszlásokat biztosítson, amelyek statisztikai tulajdonságaikban közel állnak a jövőbeli Euclid megfigyelésekhez. Ezek az adatok kulcsfontosságúak különböző analitikus és numerikus módszerek – például void detekció, gravitációs lencsézési analízis vagy spektrális torzulások – teszteléséhez és kalibrálásához.

A korábban Gower Street szimulációkon szerzett tapasztalatokat és fejlesztett eszközöket jelenleg az ELM adatokra adaptálom, különös tekintettel a void keresésre és stacking technikákra, hogy ezek a módszerek kompatibilisek legyenek a közeljövőben elérhetővé váló valós Euclid adatokkal.

Az elemzés során már lefuttattam a void detekciós algoritmust az ELM katalógusra, és most annak vizsgálatán dolgozom, hogy az egyes spektrális interloper vonalak – például az OIII vagy SIII – milyen hatást gyakorolnak a kapott void struktúrákra és a detekció megbízhatóságára.



2. ábra. Kiemeltem 5 szimulációt az 1. ábrából. Ezeknek a legnagyobb és legalacsonyabb az Ω_m értéke. Így láthatóak ezek az extrém esetek és a többi szimuláció pedig köztük helyezkedik el.

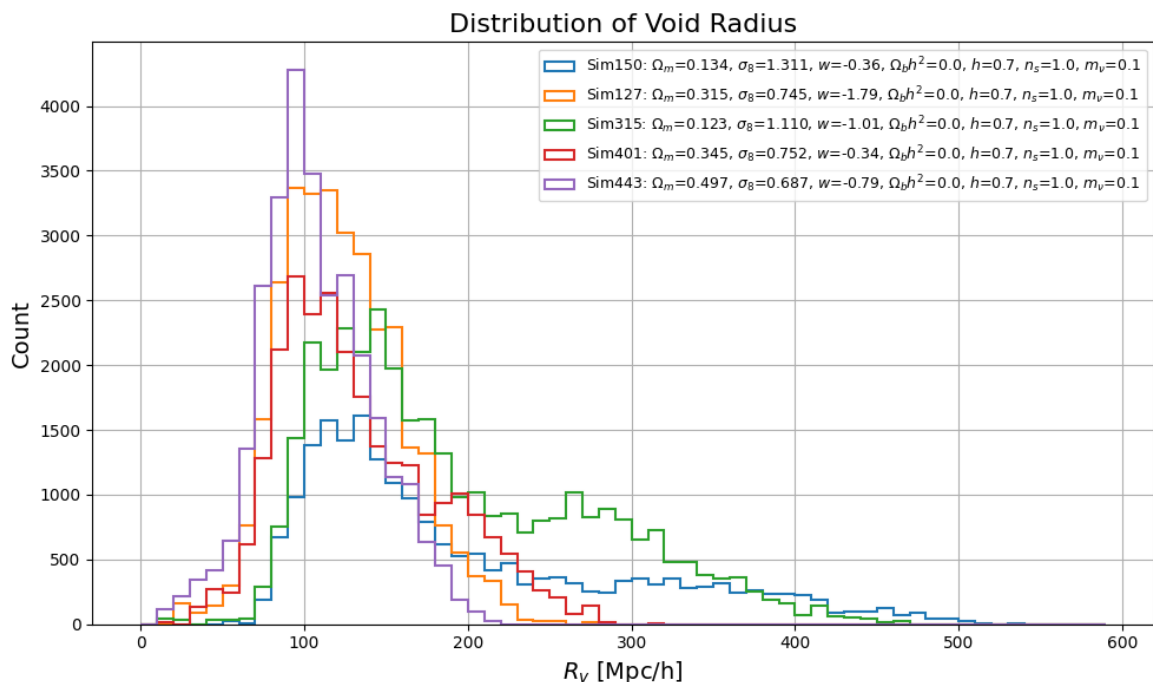
Ebben a félévben ismét jelentkeztem az ING Support and Research Studentship Programme-ba, amely egy egyéves ösztöndíjprogram a La Palma szigetén működő Isaac Newton Group (ING) keretében. A program lehetőséget biztosít arra, hogy helyben, a William Herschel Távcső (WHT) mellett dolgozzak, amely az európai földi optikai megfigyelések egyik kiemelt eszköze. A távcsövön található a WEAVE (WHT Enhanced Area Velocity Explorer) nevű többcsatornás spektrográf, amely a következő évek egyik kulcsfontosságú eszköze lesz a nagy égboltfelmérésekben.

A programban való részvétel egyedülálló lehetőséget kínál arra, hogy közvetlen tapasztalatot szerezzek a spektroszkópiai adatgyűjtés és -feldolgozás területén, valamint mélyebb betekintést nyerjek a WEAVE rendszer működésébe. Ez nemcsak a csillagászati műszeres munkában való jártasságomat erősítené, hanem közvetve hozzájárulna doktori kutatásomhoz is, amely kapcsolódik a WEAVE spektroszkópiai programjaihoz.

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

A félév során az alábbi kurzuson vettem részt:

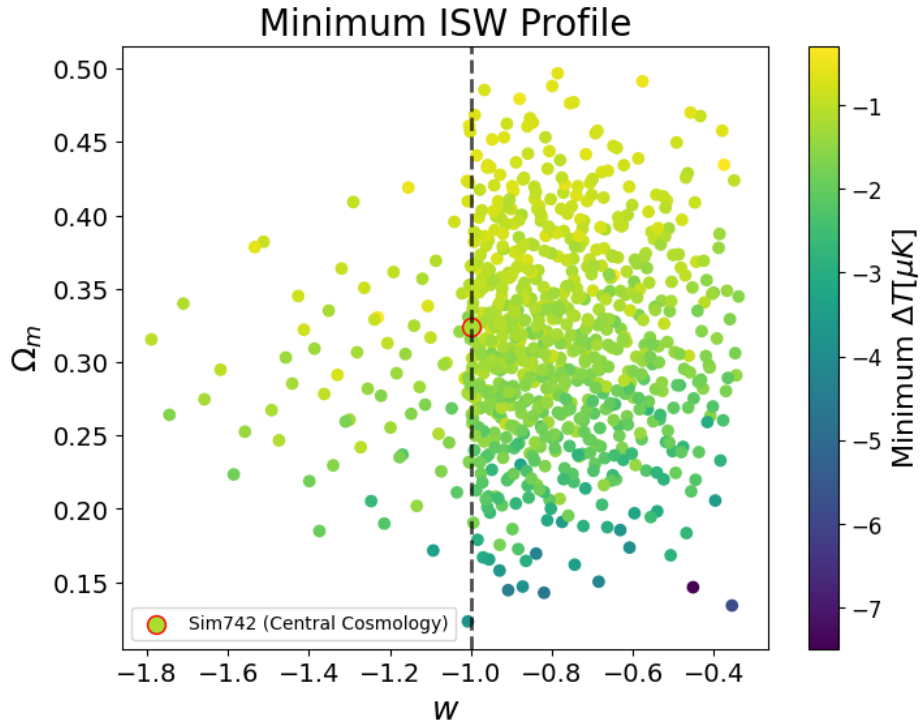
- FIZ/5/040 Az exobolygók kutatása



3. ábra. Ugyan az az 5 szimuláció a 2. ábrából. Látható, hogy a különböző kozmológiák esetében hogyan változik a voidok mérete.

Konferenciák és workshopok a doktori képzés során

- Részvétel a **WEAVE-QSO Meeting** 2023 December 5-7. Párizs, Franciaország (online)
- Előadás a **Konkoly Extragalaktikus Workshopon** (CSFK Csillagászati Intézet, 2024. március 19.) Előadásom címe: Large-scale structure analyses with the Lyman-alpha forest.
- Részvétel **IMPRS Heidelberg Summer School-on** (2024.szeptember 2-6.)
- Egyhónapos **Erasmus+** úton vettem részt az **Instituto de Astrofísica de Canarias**-nál (2024. szeptember 8. - október 8.)
- Előadás a **Konkoly Extragalaktikus Workshopon** (CSFK Csillagászati Intézet, 2025. március 21.), az előadás címe: Unveiling cosmic voids: 2D void finder algorithm, ISW maps and stacked void signals in Gower Str simulations
- Rendszeresen részt vettem a WEAVE-QSO online tele konferenciáin.
- A CosmoVerse online szemináriumain is részt vettem.
- Rendszeresen részt vettem a CSFK Csillagászati Intézetének szemináriumaim személyesen vagy online.
- Az egyetemen rendezett Ortway-kollokvium előadásain is részt vettem.



4. ábra. Ennél az ábránál vettem a profilok minimum értékeit és ezeket ábrázoltam az Ω_m és w függvényében. Pirossal bejelöltem a standard kozmológia értékéhez tartozó szimulációt, mint az 1. ábrán is látható.

Oktatási tevékenység a doktori képzés során

ELTE cseszlgk3g17ga Csillagászati észlelési gyakorlatok 3., heti 2 óra gyakorlat.

Szakmai közéleti tevékenység a képzés során

Előadtam a Csillagászati Intézetben megrendezett halloweeni programon. Illetve a nyári Perseus csillagkapus eseményeken is segédkeztem.