

# A CHARA interferométer

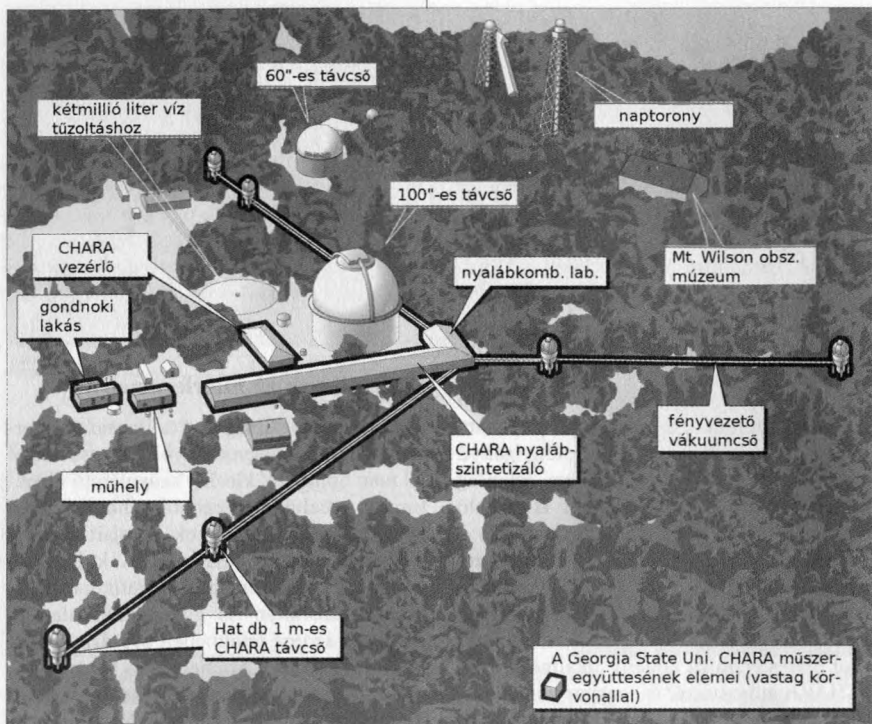
2007 júliusának utolsó hetét a Wilson-hegyi Observatóriumban töltöttem, ahol a Georgia State University által alapított Center for High Angular Resolution Astronomy (CHARA) kutatóintézetének optikai és közeli infravörös interferométerét használhattam. A Los Angeles északi peremén található obszervatórium az 1700 m-es tengerszintfeletti magasság ellenére fényszennyezés által jelentősen sűjtött területen fekszik, ám ez az interferometria szempontjából nem sok vizet zavar, hiszen a nagy fényigényű mérés technika első közelítésben jelenleg inkább csak a szabad szemmel is látható csillagokra alkalmazható, azok közül is a legfényesebb néhány százra – ezek méréseit elhanyagolható módon befolyásolja a fényes égi háttér. Az alábbiakban szeretnék beszámolni a látogatásról, az interferometria mint mérés technika néhány alkalmazásáról, a CHARA műszereiről és magyar vonatkozásairól, illetve a Wilson-hegyi Observatórium árnyas erdei ösvényeit mindmáig átható csillagásztörténeti hangulatról.

Mint minden rendes obszervatóriumba így a CHARA műszereire is pályázati rendszerben lehet távcsőidőt kapni. Éppen egy éve, 2007 januárjában küldtem be a sydney-i kollégákkal (Tim Bedding, Peter Tuthill) együttműködésben beadott pályázatomat, amelyben hosszú másodperiódusú pulzáló vörös óriáscsillagok alakjának gömbszimmetrikustól való eltérését, illetve korongjupon felszíni részletek detektálását terveztem. Mínhogy korábban soha nem foglalkoztam csillagok interferometriájával (s most sem merném magamat szakértőnek tekinteni a legkisebb mértékben is), mindenképpen szerettem volna személyesen részt venni az amerikai együttműködő felek (elsődlegesen John Monnier) által távollétemben is gond nélkül elvégezhető mérésekben. Így került sor kaliforniai kirándulásomra 2007. július 24. és augusztus 1. között, amely alatt

nemcsak interferenciacsíkokat rögzítettem az AW Cyg, AZ Cyg, T Per, RS Per és FZ Per csillagokról (ezek az infravörös ég nagyon fényes objektumai), hanem szűk egy év kihagyás után újra észlelhettem vizuálisan kedvenc északi változóimat 20x60-as binoklimal.

## Mi fán terem az interferometria?

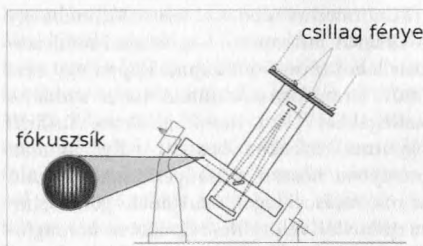
Pongyolán fogalmazva: a csillagászati interferometria a „hagyományos” távcsövekkel fel nem bontható, kicsiny szög méretű objektumok részleteit meghatározhatóvá tevő mérés technika, amelynek alapjait a fény hullámtermészete adja meg. A különböző utat bejárt elektromágneses hullámok kölcsönös erősítésén és gyengítésén alapuló elv a szó szoros értelmében évszázadok óta ismert (a kezdetek Michelson és Fizeau XIX. századi munkásságára vezethetők vissza), de a látható/közeli infravörös fény tartományában egyfajta képalkotásra is használható megvalósítása csak a legutóbbi években vált lehetővé. Rádiócsillagászok már bő fél évszázada használják a fizikai Nobel-díjjal is jutalmazott apertúra-szintézis módszerét, melynek lényege, hogy egymástól nagy távolságra elhelyezett rádiótávcsövek jeleit összekombinálva (interferáltatva) annival jobb szögfelbontást érhetünk el, mintha egyetlen olyan nagy rádiótávcsövet használnánk volna, mint aminek átmérője a jeleket vevő távcsövek egymástól legmesszebbre eső párjának távolsága. A kései optikai megvalósítás kulcskifejezése a jelek kombinálása: természetes fényforrások sikeres interferenciájához a használt hullámhossz töredékének pontosságával kell ismernünk és korrigálnunk az egyedi távcsövek között fellépő fényűkülönbséget, ami a centiméteres-méteres hullámhosszú rádiótávcsövek-nél sokkal kisebb mérnöki feladat, mint a nagyjából mikrométernyi hullámhosszú



A CHARA hat távcsőve egyharmad kilométer átmérőjű kört feszít ki, amivel behalózza az egész Wilson-hegyi Observatóriumot

optikai és közeli infravörös tartományban működő teleszkópoknál.

A legegyszerűbb csillagászati interferométerben két, egymástól adott távolságon (ún. bázison) levő tükör fényét egyesítjük; a Michelson-féle sztelláris interferométert legelőször éppen a Wilson-hegyi Observatóriumban építették meg, amikor a 100 hüvelykes (2,54 m-es) Hooker-teleszkóppal 1920 decemberében Michelson és Pease megmérték a Betelgeuse látszó szögátmérőjét. A mérést vázlatosan mellékelt ábránkon láthatjuk: az egymástól több mint 6 m-re levő két kis tükör fénynyaláb-jait a 100 hüvelykes tükör egyesíti, aminek eredményeként a fókusziszkban nem egy Airy-koronghoz hasonlító csillag-kép alakul ki, hanem jól definiált csíkrendszer, amelyben a csíkok mérete és lefutása hordozza az információt a fényforrás szögátmérőjéről.



A Michelson-féle sztelláris interferométer sematikus ábrája, illetve a fókusziszkban kialakuló csíkrendszer képe

Mivel a két tükör égi vetülete kitűz egy adott irányt, ezzel a technikával csak az abba az irányba eső átmérő mérhető meg. Egy teljes éjszaka alatt a Föld forgása a két tükör égi vetületét is elfordítja, azaz folyamatosan mérve az interferenciakép változásait kiterjeszthetjük az átmérő mérést több pozíciószögre is, ez azonban nagyon korlá-

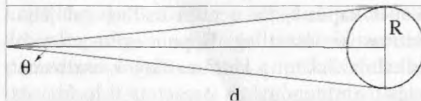
tozott és még messze van az optikai apertúra-szintézistől. Valódi interferometrikus képalkotásra több elemből álló, s egy egész síkot kifesztítő tüköregyüttesre van szükségünk, amelyben a páronként egyesített fénynyalábok interferenciájával más-más égi irányokban mintavételezzük az észlelt csillag átmérőjét, illetve felszíni fényességeloszlását. Az így kinyert információkat egymás mellé téve pedig reprodukálhatjuk a teljes csillagkorong képét, noha nem szabad elhallgatni, hogy a kapott „kép” bonyolult, mindenféle feltételezésekkel élő számítások eredménye, nem pedig valamilyen detektor által közvetlenül rögzített felvétel.

A Georgia State University által alapított CHARA rendszere gigantikus pókhálóként hat darab, egyenként 1 m-es távcsővel hálózta be a Wilson-hegyi Observatóriumot, amivel pontosan az volt a cél, hogy egyszerre sok égi irányt lefedjen a rendszer. A hat távcsőből összesen 15 pár alkotható, melyek nemcsak más-más pozíciószögeknek felelnek meg, hanem a párok távolságai is széles tartományba esnek. Utóbbival érhető el a különböző szögtartományok lefedése: a közeli távcsőpárok a nagyobb szögtávolságú, a távoli párok pedig a legfinomabb részletekre érzékenyek. A CHARA legnagyobb bázisvonala 331 méter, ami a használható hullámhosszakat figyelembe véve mintegy 200 mikroívmásodperces (0,2 mas) felbontást tesz lehetővé! Összehasonlításképpen: a Hubble Űrtávcső WFPC2-kamerájában egy pixel mintegy 0,05 ívmásodperc, azaz 50 mas méretű az égen – ez 250-szer rosszabb, mint a CHARA-rendszer maximális felbontása. Persze utóbbival soha nem fognak olyan gyönyörű, részletdús képek készülni kiterjedt, halvány égitestekről, mint a HST-vel... De nem is ez a műszeregyüttes célja.

## Mire jó az interferometria?

A legközvetlenebb válasz: csillagkorongok átmérőjének mérésére. A közel 9 évtizedes műltra visszatekintő mérés legegyszerűbb kivitelezésében feltételezzük, hogy a mért csillag kör alakú korong, egyenletes vagy

## Mérjük meg egy csillag átmérőjét!



$$\theta \approx \tan \theta = \frac{R}{d}$$

$$L \sim R^2 T^4$$

$$M = -2.5 \log L \sim -5 \log R - 10 \log T$$

$$m - M = -5 + 5 \log d$$

$$m + 5 \log R + 10 \log T \sim -5 + 5 \log d$$

$$m \sim -5 - 10 \log T - 5 \log R/d (\equiv \theta)$$

Egy  $d$  távolságban levő,  $R$  sugarú csillag  $e$  két paramétertől függő  $2\theta$  szögátmérőjét mérve könnyen belátható, hogy alapvető fizikai paramétereket határozhatunk meg. Ha a csillag hőmérséklete  $T$ , akkor az  $L$  luminozitásból származtatott  $M$  abszolút fényesség kiszámítható a sugár és a hőmérséklet értékeiből, feltételezve, hogy csillagunk követi a feketetest-sugárzás törvényeit (általában jó közelítéssel igaz). Az  $m$  látszó és az  $M$  abszolút fényességet a távolságmodulus ismert képlete köti össze a  $d$  távolsággal. Ebbe beírva az abszolút fényességet, majd az egyenletet átrendezve kiderül, hogy szoros kapcsolat áll fenn a látszó fényesség, a hőmérséklet és a szögátmérő között. Gyakorlati alkalmazásokban pl. szögátmérő mérésével határozhatjuk meg az ismert fényességű csillagok hőmérsékletét.

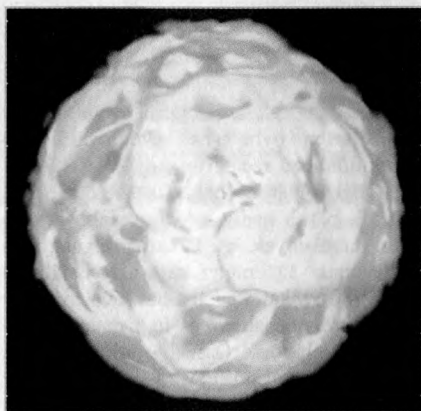
peremsötétedéses fényességeloszlással, majd a mért interferenciacsíkokhoz megkeressük azt a korongátmérőt, amivel kiszámítva az elméleti interferenciát a lehető legjobban megközelítjük a fókuszszíkból detektált képet (a gyakorlatban nem magukat a képeket, hanem az azok Fourier-transzformáltjaiból származtatott láthatóságot – visibility – illesztjük elméleti modellel, de ez a lényegesen nem változtat).

Természetesen egészen más interferenciaképet kapunk, ha a mért csillag valójában szoros kettőscsillag. Éppen ezért második alkalmazásként a kettőscsillagok asztrometriáját említeném: az összetett interferenciacsíkok elemzésével kiszámítható az adott pár komponenseinek szögtávolsága, illetve pozíciószöge. Hosszú időn keresztül megismételt mérésekkel kirajzolódhat a rendszer teljes pályája, amiből viszont már szinte a teljes fizikai leírás válik lehetővé (pl. tömegek, luminozitások, távolság). Itt említem meg, hogy Csizmadia Szilárd és munkatársai az Algolt észleltették a CHARA-val, aminek eredményeként az elméleti szakembereknek komoly fejtorést okozó pályainklinációt határoztak meg.

Harmadik, s kutatási tervemet megalapozó példa a csillagkorongok felszíni részleteinek felbontása. Az elmúlt másfél évben a CHARA-rendszer MIRC elnevezésű közeli infravörös kamerája a Vega és az Altair különleges, a pólusok felé melegedő felszíni hőmérsékleteloszlásának megméréseivel váltott ki nagyobb szakmai visszhangokat (mindkettőről beszámoltunk a Csillagászati hírekben). A MIRC a CHARA hat távcsövéből négyet használ, azaz összesen hatféle párosítással állít elő interferenciaképeket, melyekben a legnagyobb bázistávolság 270 méter. Az 1,6 és 2,2 mikronon működő MIRC John Monnier, a University of Michigan munkatársának páratlan szakmai hozzáértését és műszerépítő ügyességét dicséri, emellett pedig a CHARA távcsöveinek fényét egyesítve az északi féltekén működő legérzékenyebb és legnagyobb felbontású infravörös interferométert testesíti meg.

Célunk néhány vörös óriás és szuperóriás alakjának meghatározása és felszíni fényességeloszlásának feltérképezése volt. Konkrét eredményekről még nem tudok beszámolni, de az öt csillagról felvett több tíz gigabájtnyi adat (a MIRC infravörös CCD-jével rögzített interferenciacsík-képek tízezrei) remélhetőleg egyedi információk kibogozását teszi majd lehetővé 2008 során. A vizsgált objektumok mindegyike felfúvódott gázgömb, aminek nincs jól definiált

szilárd felszíne, azaz az alak meghatározása, a felszíni foltok értelmezése komoly modellezést igénylő feladat. Azt azonban érdemes megjegyezni, hogy mind az elméletek, mind a rendelkezésre álló mérési adatok azt sugallják, hogy a Napunk esetében több milliós granulációs cella alakjában észlelhető konvektív zóna teteje vörös óriásokban egészen más szerkezetű, s elképzelhető, hogy ezekben a csillagokban alig néhány, esetleg néhány tucat cella fedti le az egész felszínt (l. ábránkat). Ennek igazolása, illetve a célak számára adott megszorítások a csillagok konvektív energiaterjedésére vonatkozó elméleteket tesztelhetik, ami talán a mérések legfontosabb célja. Szintén érdekes lehet az aszimmetrikus, elnyúlt alak, amit pl. közeli szoros kísérő, akár már a közösburok-fázist jellemző elnyelt társ is okozhat.



A VX Sgr vörös szuperóriás szimulált felszíni képe, melyen óriási konvektív cellák láthatók sötétebb és világosabb foltok alakjában

## A CHARA helyszínén

Első nap megérkezve azonnal szembesültem a júliusi télből júliusi nyárra érkező minden izzasztó következményével. Theo ten Brummelaar, a CHARA vezetője vitt fel autójával a hegyi úton, amely mellett bő száz évvel korábban öszvérháton szállították fel a legelső Wilson-hegyi távcsövek alkatrészeit. A vakító ég alatt hétágra sütő Nap sem tudta feledtetni nagy-Los Angeles szmogfelhőit,



A CHARA hat távcsövének egyike. Alul a fényvezető vákuumcső melyeket csak valahol 800–1000 m magas-ságban hagyunk magunk mögött.

A Wilson-hegyi Observatórium messziről fehérlő kupolái jelzik a 12 órás repülőút, majd a nemzetközi reptérről Pasadenaig eljutás, végül a hegyekbe vezető autózás végső célpontját. A történelmi távcsövek közül ma már csak a 60 hüvelykeset használják rendszeresen, de azt se tudományos kutatásokra, hanem tehetősebb érdeklődők, amatőrök bérlik ki a holdmentesebb időszakokban vizuális észlelésekre (1–25 fős csoportoknak 800 dollár fél éjszaka, 1500 dollár egy éjszaka, létszámtól függetlenül). Ki-ki döntse el magának, hogy megé-re 200–250 ezer forintot egy másfél méteres távcsövel való nézelődés...

Mint említettem, Los Angeles és külvárosainak együttesen mintegy 12 milliós lakossága erős fényszennyezés forrása. Első éjjel volt pár óra sötét éjszaka a holdnyugta után, s az erős 4-es, esetleg 5–5,2 szabadszemes határfényesség a kizárólag Cygnusban látszó Tejútal nem tartozott életem legszebb sötét éges élményei közé. Aznap éjjel még nem volt enyém a CHARA és a MIRC, így nyugodtan észlelgettem a szegedi éveimet idéző égen – hajnalban három tucat változó fényességbecslésével estem be az egyik vendégszoba ágyába.

Másnap megismerkedtem a CHARA vezérlőjével, ill. az intézmény két magyar munkatársával, Sturmman Lászlóval és ked-

ves nejevel, Judittal. Mindketten kezdettől fogva tagjai a kutatócsoportnak, legfőbb feladatuk pedig a működés során felmerülő problémák, fejlesztések, optikai feladatok megoldása, végrehajtása – egyszóval a műszeregyüttes stabil futásáért felelősként rendkívül fontos szerepet játszanak a CHARA életében. Jó másfél évtizede élnek az USA-ban, s rövid ott-tartózkodásom legkedvesebb emlékei közé tartozik a velük való találkozás, a közösen eltöltött idő és a beszélgetések.

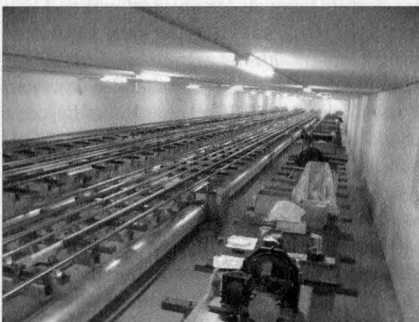
Harmadik éjszaka kezdtem a konkrét méréseket az időközben szintén megérkező John Monnier vezetésével. Első pillanatban világgossá vált, hogy az éppen mért csillag kiválasztásán kívül sok szerepet nem kaphatok: a MIRC-mérésekhez használt négy távcsövet külön teleszkóp-operátor vezérelte összesen 6 monitoron, a MIRC-et magát pedig John, „csak” két monitoron, alig 6–8 ablakot szemmel tartva. Harmadik átmért éjszakánkon aztán már magam is vettem fel adatokat a MIRC rendszerével, de a távcsövekhez eleve nem nyúlhat senki az éjszakai asszisztensen kívül. Azt addig is tudtam, hogy az interferometria nem könnyű mesterség, de élőben szemtanúja lenni a rendszerek komplexitásának mindig megrázóbb.

Csak egy példát hadd ragadjak ki a sok közül. Mint a bevezetőben említettem, a természetes fényforrások interferenciájához



„A távcsövekről érkező nyalábok átmérőjének szabályozhatósága nagyon fontos” (Sturmman Judit)

a különböző távcsövek fényűtkülönbségét a hullámhossz töredékének pontosságával kell ismerni, ill. kiküszöbölni. Ha pontosan zenitbe néz mindegyik teleszkóp, akkor az éppen ott tartózkodó csillag hullámfrontjai ugyanabban az időben érik el az összes távcsövet, így ugyanakkora úton elvezetve a fényt az interferométerig, elvileg kialakulhat a jellegzetes csíkszerkezet. Azonban mielőst a zenittől eltérő irányban észlelünk, a különböző távcsövekhez más-más időpontban ér el ugyanaz a hullámfront, s az akár száz métert is elérő útkülönbséget néhány tíz nanométeres pontossággal kell kompenzálni.



A hat darab, egyenként 46 m hosszú sínpár, melyeken a nyalábkélesztető tükröket mozgató kiskocsik gurulnak

Ezt a gyakorlatban úgy érik el, hogy a vákuumcsöveken át a távcsövektől elvezetett fénynyalábok úthosszát az egyesítés előtt a CHARA nyalábszintetizálójában kiegyenlítik: hat darab, egyenként 46 méter hosszú sínpáron kiskocsikra szerelt tükrök mozgásával mindegyik távcsőről érkező nyaláb ide-oda tükrözéssel késleltethető pontosan annyit, hogy a nyaláb kombináló laborba már ugyanaz a hullámfront érkezen meg mindenhol. A kocsik mindenkor helyzetét nagyon pontos lézer-interferométeres telemetria adja meg.

Ha ez így egész egyszerűen hangozna, lépünk ki a való világba: a Föld forog. Márpedig nem is kis sebességgel, óránként 15 fokot elfordulva. Emiatt a több száz méteres bázisonalú távcsőpároknál a fényűtkülönbség gyakorlatilag több cm/s sebességgel változik,

azaz a nyalábkélesztető kiskocsiknak adott esetben több centimétert kell másodpercenként megtenni úgy, hogy a rajtuk levő tükrök helyzete 10–20 nm-es pontossággal ismert és meghatározott! Ezt nem is lehet csak magával a kocsik mikroszkopikus szinten durva mozgásával elérni, ezért a fényvisszaverő tükrök a kocsikon egy elektromágnesesen finomhangolható tartón vannak, ami a távolságokat másodrendben korrigálja, rajta pedig egy piezoelektromos távtartó koronázza meg harmadlagos korrekciókkal az ultraprecíz telemetriát. És az egész rendszer ráadásul képes a változó légköri viszonyokból fellépő fényűtkülönbséget is korrigálni („vezetni” az interferenciaképre) – mindezt valós időben!

## Wilson-hegy: fényes múlt, fényes jövő

Egyik éjjel körbesétáltam az obszervatórium területén. A holdfényben úszó táj összekapcsolódott az ide köthető óriási felfedezések tudatával, s enyhén szentimentális hangulatban tisztelegtem Hale, Shapley, Humason, Hubble, Baade és nagy hatású észlelő társaik előtt. Hiszen itt dolgozó csillagászok ismerték fel, hogy a Nap nem a Tejútrendszer középpontjában van (Shapley); fedezték fel, hogy számtalan galaxis létezik még a Tejútrendszeren kívül (Humason, Hubble), a Napnak pedig jelentős mágneses tere van, ami fontos szerepet játszik aktivitásában (Hale); az Univerzumot létrehozó ősrobbanás jeleként a galaxisok távolodnak (Hubble), saját galaxisunkon belül pedig különböző korú csillagok populációi különíthetők el (Baade). A ma csillagásznak nem sok esélyük van egyetlen műszert használva ekkora horderejű felfedezések tételére – a tudomány ma már egészen másképpen működik, mint száz éve. A CHARA egy szűk szakterületen, a csillagok interferometrikus vizsgálataiban játszik vezető szerepet, miközben olyan nagygyűk is porondon vannak, mint az Európai Déli Obszervatórium 8 m-es távcsöveket összekapcsoló VLT interferométerre.

Kiss László