

Ábrahám Péter–Kóspál Ágnes Korongok fiatal csillagok körül

Bevezetés

Az 1700-as évek második felében I. KANT és P. S. LAPLACE egymástól függetlenül megalkották a Naprendszer születésének első tudományos igényű elméletét. Elképzelésük szerint a Naprendszer egy forgó por- és gázfelhőből alakult ki, amely saját gravitációs terében összehúzódott és egyre gyorsabban forgó, lapos koronggá alakult. A korong közepén született meg a Nap, s a pereméről leváló anyaggyűrűkből jöttek létre a bolygók.

A lapos, forgó csillagkörüli korong képe visszaköszön a jelenkori csillagkeletkezési elméletekben is. A modern elméletekben azonban a korong sokkal összetettebb fizikai rendszer, mint a 18. századi elődje volt. Szerepe természetesen továbbra is az, hogy biztosítsa a születőfélben lévő csillag további növekedéséhez, illetve később a bolygórendszer keletkezéséhez szükséges anyagot. Ezenkívül azonban komplex fizikai folyamatok is lejátszódnak benne, melyek lelassítják a behulló anyagot, lehetővé téve, hogy a korong anyaga valóban eljuthasson a protocsillag felszínére. Az anyagbefogás során felszabaduló energia hőszugárzás formájában távozik a rendszerből, megfigyelhetővé téve azt egy infravörös teleszkóp számára. Egészen friss mérések arra is utalnak, hogy a korong belsejében a porszemcsék összetapadhatnak és növekedésnek indulhatnak, illetve megolvadva átkristályosodhatnak, ami fontos lehet a bolygókeletkezés elindulásához. Végül valószínűnek tűnik, hogy a korongoknak is lehet belső szerkezetük: bennük spirálkarok illetve gyűrűk, vagy a kísérek, bolygók hatására üres belső tartományok alakulhatnak ki.

A csillagkörüli korongok hosszú életű képződmények, amelyek végigkísérik a kis és közepes tömegű csillagok néhány millió éves ifjúkorát. A korongokban vannak azonban olyan jelenségek, amelyek sokkal gyorsabb időskálán játszódnak le. Az *FU Orionis* típusú változócsillagok látványos, néhány hónap vagy év alatt történő felfényesedését a legtöbb mai elmélet a korong belső peremén hirtelen meggyorsuló anyagbefogással magyarázza. Talán erre szolgáltat példát a 2004 elején feltűnt *McNeil-köd* is, amelyről később még lesz szó. Lehetséges, hogy a protocsillagok az összes anyagukat FU Orionis-szerű periódusokon keresztül gyűjtik össze.

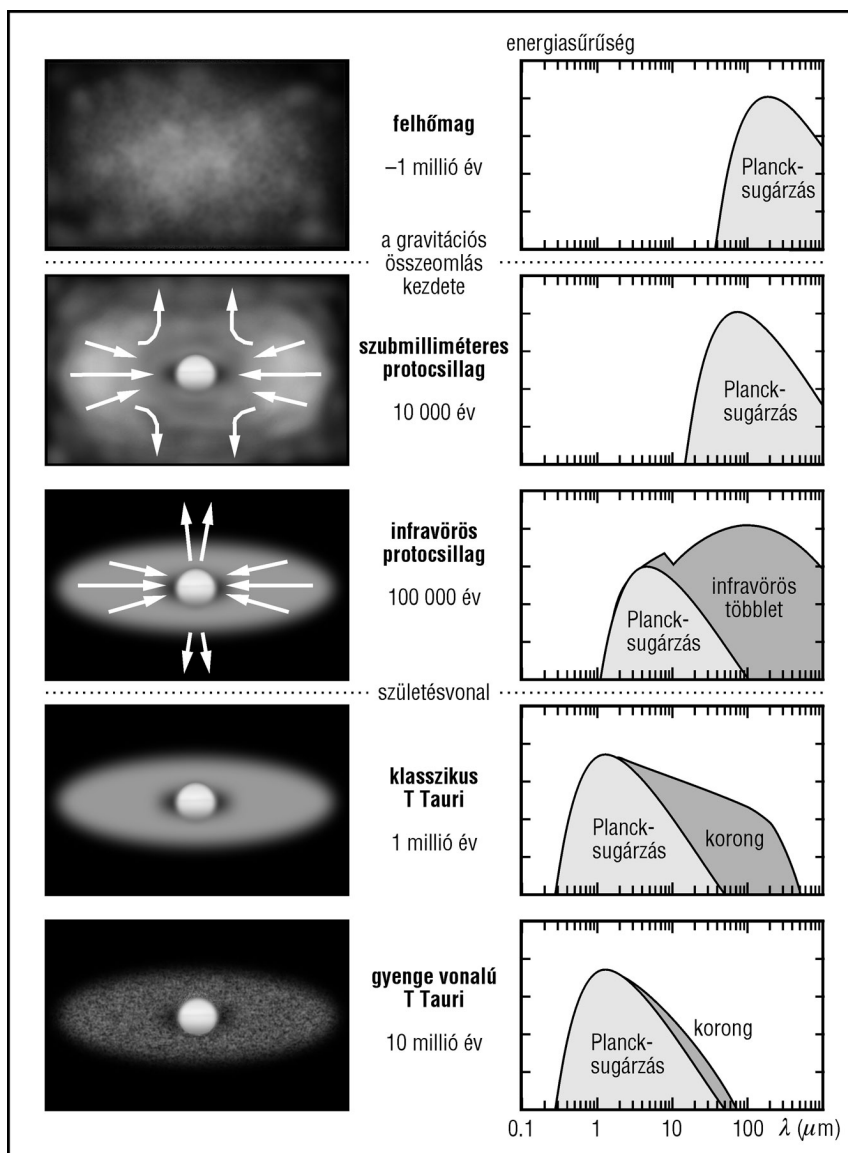
A következőkben a fiatal csillagok körüli korongokkal ismerkedünk meg részletesebben. Miközben a korongok szerkezetén gondolkodunk, vagy a legnagyobb távcsövek által készített felvételeket szemléljük, jusson eszünkbe, hogy voltaképpen a saját Naprendszerünk múltjában is bűvárkodunk.

A csillagok keletkezésétől a fősorozatig

Ahogy ma elképzeljük, a csillagok óriás molekulafelhőkben, a csillagközi anyag összesűrűsödésével, általában csoportosan keletkeznek, és ez a folyamat a Tejútrendszerben ma is tart (12. kép a színes mellékletben). A kis ($< 2 M_{\odot}$) és közepes ($2-8 M_{\odot}$) tömegű csillagok keletkezésének főbb állomásait a 3.1. ábra mutatja. Amikor a molekulafelhőben elkezdődik egy felhőmag gravitációs összeomlása, a felhőmagban a gáz még olyan ritka, hogy átlátszó a saját sugárzása számára, így az összehúzódás során a hőmérséklete nem változik. Amikor azonban a felhőmag közepe olyan sűrűvé válik, hogy már átlátszatlan a hősugárzás számára, akkor nőni kezd benne a hőmérséklet és a nyomás. Az összeomlás megáll, belül kialakul egy, a környezetével nyomásegyensúlyban lévő protocsillag, amire kívülről tovább hullik az anyag. Mivel a felhőmagnak kezdetben nullától különböző perdülete volt, az anyag nem tud közvetlenül a protocsillagra hullani, hanem kialakul egy lapos képződmény, az *anyagbefogási (akkréciós) korong*. Ebben az anyag lassan befelé spirálózik, miközben a perdülete a külsőbb tartományoknak adódik át. A csillagban közben beindul a deutérium- majd a hidrogénfúzió, és a csillagból kifelé is megindul a gázáramlás, a csillagszél. A csillag lassan szétfújja az őt körülvevő korongot és gázburkot, és az optikai tartományban is láthatóvá válik. A $2 M_{\odot}$ -nál kisebb tömegű fiatal csillagokat *T Tauri csillagoknak*, a $2-8 M_{\odot}$ tömegűeket *Herbig Ae/Be csillagoknak* hívjuk.

A csillagkörüli korongok megfigyelése

A csillagkörüli korongok közvetlen megfigyelése az 1990-es évek közepéig reménytelennek tűnt. Szép számmal akadtak azonban olyan közvetett bizonyítékok, amelyek együttes magyarázatára leginkább a korong-hipotézis volt alkalmas. Ilyen volt az optikai fényelnyelés és az infravörös sugárzás mennyiségi összehasonlítása: ha a korongok infravörös fényessége alapján meghatározott portömeget gömbszimmetrikusan helyeznénk el a csillag körül, jóval nagyobb vörössödést kellene látnunk, mint amekkorát valójában észlelünk – tulajdonképpen a csillagnak nem is volna szabad látszania az optikai tartományban! Ha viszont korong alakban rendezzük el ugyanezt az anyagmennyiséget, akkor



3.1. ábra. Kis és közepes tömegű csillagok fősorozat előtti fejlődésének főbb állomásai

a korong síkjától távolabbi irányokból a csillag fénye a külső észlelő számára csak enyhén vörösödött.

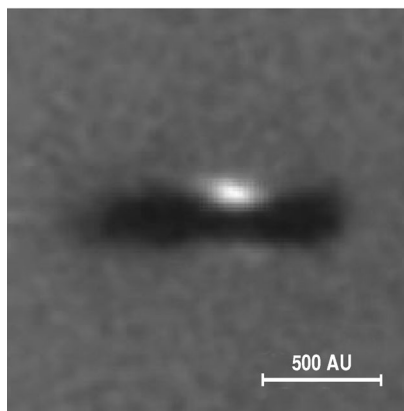
Egy másik, hasonlóan erős érv volt, hogy aszimmetrikus vonalprofilokat figyeltek meg olyan színképvonalak esetében, amelyek a csillagról kiáramló forró plazmában keletkeznek. A profil kék (közeledő) oldala jól jelentkezett, a vörös (távolodó) oldala viszont hiányzott. Ez jól magyarázható azzal, hogy a csillagot a látóiránnyal szöget bezáró átlátszatlan korong veszi körül. A kidobott plazma távolodó része a korong mögött, annak takarásában helyezkedik el, míg a közeledő komponensre szabad rálátásunk van.

Végül a fiatal csillagok esetén gyakran megfigyeltek kisebb vagy nagyobb mértékben fókuszált, kétirányú anyagkilövelléseket is, ami azt mutatja, hogy a csillag körüli térrész geometriája eltér a gömbszimmetrikustól. A korongnak lényeges szerepe lehet a kifúvás fókuszálásában is.

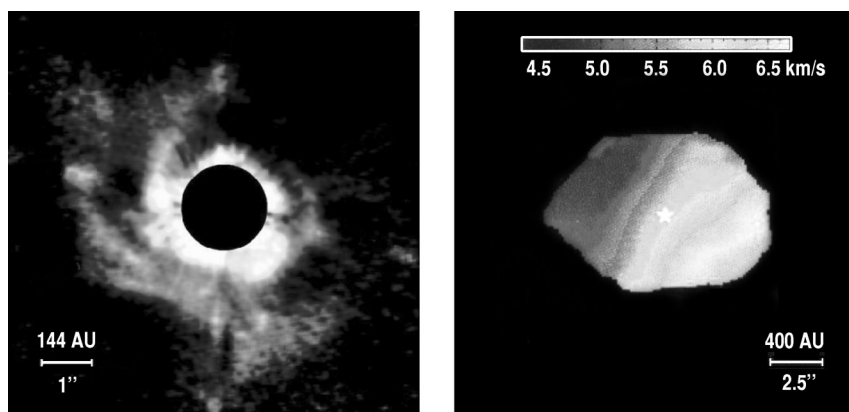
A korongok közvetlen megfigyelése

Az áttörést a Hubble-űrtávcsőnek az Orion-ködről készített híres felvételei hozták, amelyeken a köd fényes háttére előtt sötét árnyként tűntek elő a csillagkörüli korongok (3.2. ábra). Ma már ennél is részletesebb képeket is lehet kapni. A 3.3 ábra bal oldala az *AB Aur* fiatal csillag környezetét ábrázolja. Jól látható a korong finomszerkezete, a 2–3 spirálkar. Hogy valóban korongról van szó, azt igazolja az ábra jobb oldala, amely ugyanezt a területet mutatja, de a ^{13}CO molekula milliméteres hullámhosszúságú színképvonalában. A színképvonal frekvenciájából – a Doppler-eltolódás alapján – ki lehet számítani a sugárzó anyag látóirányú sebességét. Az ábra szerint a korong bal oldala a csillaghoz képest közeledik felénk, míg a jobb oldala távolodik, ami a korong forgását bizonyítja.

A közvetlen képek (pl. a 3.2. ábra) felvilágosítást nyújtanak a korongok külső méretéről, amit egyéb módszerekkel nehéz lenne meghatározni. Ezek alapján a korongok jellemző kiterjedése 500–1000 AU, s a képek alapján meg lehetőségen „korongszerűnek”, azaz laposnak látszanak. Milliméteres hullám-



3.2. ábra. Az Orion 114–426 jelű fiatal csillaga a Hubble-űrtávcső felvételén [1.]. A csillagot szinte teljesen takarja az élével látszó sötét korong



3.3. ábra. Balra: Az AB Aur közepes tömegű csillag korongjáról közeli infravörös hullámhosszakon készített felvétel (Subaru-távcső [2.]). Jobbra: Ugyanezen korong sebességtérképe (Keck-távcső [3.]). A látóirányú sebességek eloszlása a korong forgását bizonyítja

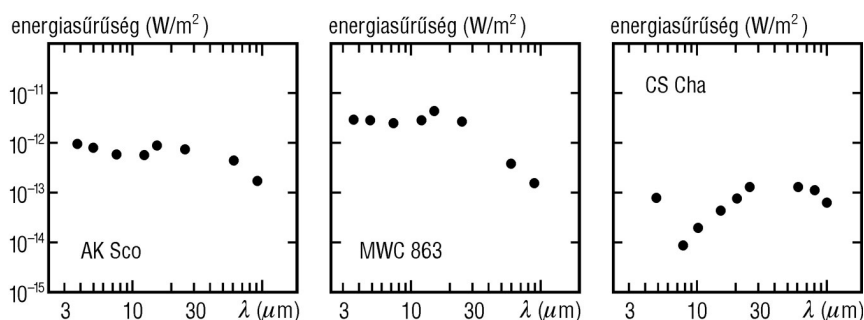
hosszakon lehetőség van arra is, hogy megmérjük a teljes portömeget, amiből – átlagos por/gáz arányt feltételezve – megtudható, hogy a jellemző korongtömeg $0.01 M_{\odot}$. Ez elegendő egy Naprendszerhez hasonló bolygórendszer kialakulásához.

A korongok sugárzásának hullámhossz szerinti eloszlása

Az előző fejezetben bemutatott, részletes képek a korongok létezésének megdönthetetlen bizonyítékai. A csillagközi anyagra vonatkozó legfontosabb eredmények azonban mégis inkább a fiatal csillag környezetének több hullámhosszon történő mérésein alapulnak. A csillag az optikai tartományban világít, korongjának sugárzását viszont jóval hosszabb hullámhosszakon, az infravörös, a szubmilliméteres és a rádiótartományban kell keresnünk. Ennek oka a a korongok viszonylag alacsony felszíni hőmérséklete, amely hasonló a bolygórendszerünkben szokásos, néhányszor $10\text{--}100\text{ K}$ körüli értékekhez. Egy ilyen hőmérsékletű anyag sugárzása nagyrészt a porszemcsék emissziójából származik, amelynek maximuma az infravörös hullámhossztartományba esik. Mivel a korongban a hőmérséklet a csillagtól távolodva folyamatosan csökken, a rendszer sugárzásának színe nem egy adott hőmérsékletre tartozó feketetest-sugárzás lesz, hanem olyan folytonos spektrum, amely lefedi szinte az egész infravörös – szubmilliméteres ($1\text{--}1000\ \mu\text{m}$) hullámhossztartományt.

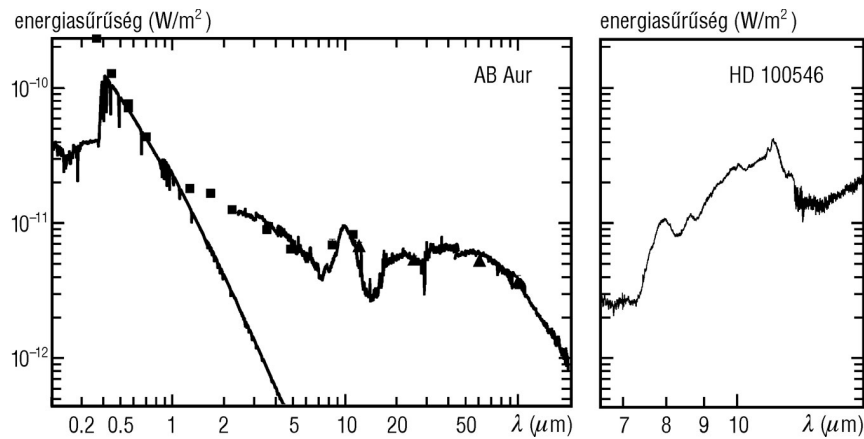
A spektrális energia eloszlása a csillag fejlődése során változik, ezt szemléltetik sematikusán a 3.1. ábra jobb oldali oszlopában található rajzok.

Az infravörös sugárzás megfigyelése a Föld felszínéről csak korlátozottan lehetséges, ezért jelentős szerep jut az űrteleszkópoknak (a szubmilliméteres megfigyelések részben a Földről is elvégezhetők). Az Európai Űrügynökség *Infrared Space Observatory (ISO)* mesterséges holdja (1995–1998), amelynek adatfeldolgozásában magyar kutatók is tevékeny szerepet vállaltak [4., 5.], nagyszámú fiatal csillag spektrális energiaeloszlását mérte meg. A 3.4. ábrán három példa szerepel, valamennyi az ISO fotométere, az ISOPHOT mérésein alapul. Meg kell jegyezni, hogy ezekben a mérésekben – a műszer rosszabb szögfelbontása miatt – a csillag és a korong együttes sugárzását lehetett csak meghatározni.



3.4. ábra. Három fiatal csillag spektrális energiaeloszlása infravörös hullámhosszakon. A mérések az ISO ISOPHOT műszerével készültek

Az ábra sugallja a korongok változatosságát, szerkezeti különbségeiket. Az első képen az *AK Sco* nevű fiatal csillag körüli, jól fejlett korong spektrális energiaeloszlása látható. A korong az egész infravörös tartományban egyenletesen sugároz, jelezve, hogy csillaghoz közeli meleg, és csillagtól távolabbi hidegebb anyag is van jelen a rendszerben. Az objektum sugárzása még a 60 μm -es hullámhossz környékén is jelentős, ami nagyjából 50–100 K hőmérsékletű port jelez. A második csillag, az *MWC 863* spektrális energiaeloszlása hasonló az előbbihez, azonban a maximum rövidebb hullámhosszakra tolódott, azt sugallva, hogy a korong külső részén kevés a hidegebb anyag, vagy teljes egészében hiányzik. A harmadik objektum, a *CS Cha* korongja szintén nem teljes, azonban itt a rövid hullámhosszú ($\lambda < 10 \mu\text{m}$) sugárzás alacsony szintje (amely ebben az esetben nem is a korongtól, hanem szinte kizárólag a csillag fotoszférájából származik) azt sejteti, hogy valamilyen okból a korong belső, meleg része is alig tartalmaz anyagot.



3.5. ábra. Balra: Az *AB Aur* fiatal csillag spektrális energiaeloszlása optikai és infravörös hullámhosszakon. A mérőműszerek felbontása miatt valamennyi adatpont a csillag és a korong együttes fényét mutatja. Az optikai tartományban ($1\ \mu\text{m}$ alatt) a csillag dominál, viszont 1 és $2\ \mu\text{m}$ között a korongé a vezető szerep. Jobbra: a *HD 100546* (*KR Mus*) jelű csillag színeképének részlete kis méretű szilikátok jelenlétét mutatja. A legmagasabb keskeny csúcs $11.3\ \mu\text{m}$ -nél kristályos szilikátokra utal [6.]

A korongok anyaga por és gáz, hiszen eredetileg csillagközi anyagból jöttek létre. Anyagi összetételükről azonban többet is megtudhatunk a nagy felbontású infravörös színeképek vizsgálatából. A 3.5. ábra bal oldala ugyanannak az *AB Aur* csillagnak a színeképét mutatja, amelynek korongjáról az előző fejezetben részletes képeket láttunk. A színeképben azonnal szembetűnik a $10\ \mu\text{m}$ körüli hatalmas csúcs, amelyet amorf szerkezetű (azaz üvegszerűen kristályosodott) szilikátokból álló porszemcséknek szokás tulajdonítani. A spektrális csúcs észlelhetőségének feltétele még az is, hogy a szemcsék kicsiny (μm alatti) méretűek legyenek. Ha ugyanis a szemcseméret meghaladja a sugárzás hullámhosszát – esetünkben a $10\ \mu\text{m}$ -t –, akkor már csak spektrális alakzatokat (vonalakat, sávokat) nem mutató feketetest-sugárzást várhatunk.

Az ábra jobb oldalán egy másik fiatal csillag, a *HD 100546* színeképének $10\ \mu\text{m}$ körüli részletét láthatjuk [6.]. Szembetűnő, hogy a spektrális csúcs alakja jelentősen eltér az *AB Aur* esetétől: a maximum hosszabb hullámhosszakra tolódott, és egy keskeny lokális csúcs tűnt fel a $11.3\ \mu\text{m}$ környékén. A legvalószínűbb magyarázat szerint ez a csúcs szintén szilikát alapú porszemcséktől származik, azonban ezek szerkezete nem amorf, hanem kristályos (hasonló szemcsékre utaló jeleket találtak egyébként a mi Naprendszerünk néhány üstökösében is). A kristályos szilikátok jelenléte fontos információ a korong ko-

rai történetére vonatkozóan is, mivel azt sugallja, hogy a korong anyaga (vagy legalább is annak egy része) megolvadt majd lassan kikristályosodott.

A korongok szerkezete

Az ismertetett megfigyelések nem tárják fel a korongok belső szerkezetét, hőmérséklet- és sűrűségeloszlását. Ezt már csak azért is fontos lenne tudnunk, hiszen ez határozza meg, hogy a bolygókeletkezés során a csillagtól mekkora távolságban kedvezőek a feltételek egy bolygó kialakulásához. A következőkben először a főszerepet játszó anyagbefogás működését tekintjük át, majd két „alapmodellt” ismertetünk, amelyek természetesen a valóság erős leegyszerűsítései, de bepillantást nyújtanak a korongok fizikájába.

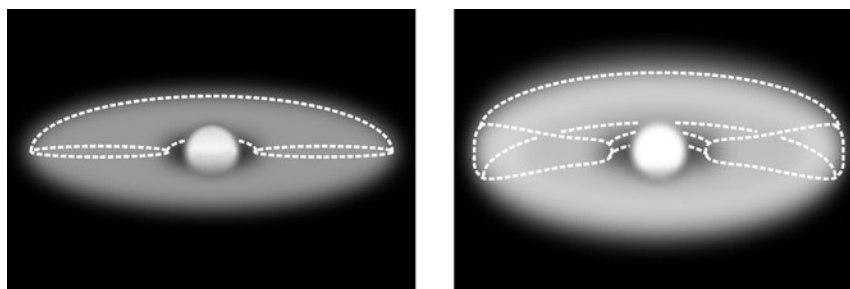
Az anyagbefogás folyamata

Hogyan fogja be a csillag az anyagot a körülötte levő korongból? E kérdésre a válasz korántsem egyszerű. Többféle elképzelés van a folyamatról, de általánosan elfogadott válasz ma még nincs. A fő probléma az, hogy a csillag körül keringő gázzrészecskének és porszemcséknek jelentős perdületük van. A perdületmegmaradás miatt – a Nap körül keringő bolygókhoz hasonlóan – nem hullhatnak a csillagba, ha perdületüket valamilyen módon nem tudnák átadni. A bolygókkal ellentétben azonban a korongot alkotó részecskék állandó turbulens mozgásban vannak, kicserélődnek, némelyik anyagdarabka a csillaghoz közelebbi pályára kerül, ezzel egy időben más darabkák pedig kissé távolabbi pályára. Mindez úgy történik, hogy a rendszer összperdüllete állandó, energiája pedig minimális legyen. Nagy léptékben ezért a korong anyagának egy kis része messzire eltávolodik a csillagtól (és nagyon nagy perdületű pályákon kering), míg az anyag nagyobb része (mivel a perdület problémája így „elintéztnek” tekinthető) ráhullik a csillagra. Az ehhez szükséges perdületátadást úgy képzelhetjük el, hogy a korong anyaga súrlódik, így a belső, gyorsabban forgó gyűrűk megpróbálják felgyorsítani a külsőbb, lassabban forgó gyűrűket. Ennek a – közönséges folyadékok vagy gázok belső súrlódásához, viszkozitásához hasonló – hatásnak a csillagkörüli korongok esetében több oka is lehet: a korong anyagának turbulens konvekciója, mágneses, vagy gravitációs kölcsönhatásai.

Korongok egyszerű fizikai modelljei

Sík és átlátszatlan korongok

A legegyszerűbb korongmodell egy nagyon vékony, de átlátszatlan korong, olyan, mint egy lemezjátszókorong, jól meghatározott sugárirányú sűrűség- és hőmérséklet-eloszlással (3.6. ábra).



3.6. ábra. Balra: sík, átlátszatlan korong modell. Jobbra: kifelé vastagodó korong, (trapézkorong)

Egy ilyen sík korong kétféle forrásból nyerhet energiát:

1. A passzív korong elnyeli a csillag kis szögben ráeső fényét, ettől felmelegszik, így újra kisugározza a csillagtól kapott energiát infravörös sugárzás formájában.
2. Az aktív korongoknak ezzel szemben van saját belső energiaforrásuk is: a korongban befelé spirálozó anyag súrlódása miatt ugyanis szintén hő termelődik.

Érdekes módon a korongok sugárirányú hőmérséklet-eloszlása mindkét esetben $T \sim r^{-3/4}$, ahol T a hőmérséklet, r a csillagtól mért távolság. Az ebből kiszámolt színkép lefutása a hullámhossz függvényében $\nu F_\nu \sim \lambda^{-4/3}$, ahol ν a frekvencia, F_ν az egységnyi frekvenciatartományra eső fluxus, λ a hullámhossz. Egy ilyen színképet láthatunk a 3.1. ábrán a klasszikus T Tauri csillagnál. Ez persze azt is jelenti, hogy egyedül a színkép alakjából nem tudjuk megállapítani, hogy egy csillag körül passzív vagy aktív korong van-e.

Kifelé vastagodó korongok

Kicsit bonyolultabb modellt kapunk, ha a korong vastagságát nem hanyagoljuk el. Ekkor úgy számolhatunk, hogy az anyag a korong síkjára merőlegesen hidrosztatikai egyensúlyban van (hasonlóan pl. a földi légkörhöz). Mivel a csillagtól távolodva csökken a csillag gravitációs vonzása és csökken a hő-

mérséklet is, ezért a korong vastagsága függ a csillagtól mért távolságtól: a csillagtól távolodva egyre vastagabb lesz (3.6. ábra).

Az angol szakirodalomban ezt a modellt *trapézkorongnak* (*flared disk*) nevezik, ami arra utal, hogy oldalnézetben ez a korong úgy nyílik szét, mint egy trapéznadrág szára. Egy ilyen korongot nagyobb szögben világít meg a központi csillag, ezért a sík koronghoz képest a hőmérséklet kevésbé csökken a csillagtól távolodva. Ez a hőmérséklet-eloszlás a sík koronghoz képest kevésbé meredek spektrális energiaeloszlást eredményez.

További részletek

Az előbbieken felvázolt egyszerű modelleket sok apró részlettel tehetjük valóságosabbá:

- A korong legbelső, legforróbb része felpuffadhat, és így leárnyékolja a korong többi részét.
- A trapézkorong nem nyílhat szét a végtelenségig, lesz egy távolság, ahonnan a vastagsága csökkenni kezd, és ennek megint az a hatása, hogy a külsőbb részeket leárnyékolja.
- A korong nem feltétlenül egy széles gyűrűből áll, mint a 3.6. ábrán. A korong több, különálló gyűrűre szakadozhat (hasonlóan a Szaturnusz gyűrűrendszeréhez). Ennek az lehet az oka, hogy a korongban már létrejött néhány bolygó vagy bolygókezdemény, ezek hatására bizonyos pályák gravitációsan instabilak, így kiürülnek, míg más gyűrűkben összegyűlik az anyag.
- A korong nem feltétlenül hengersizmetrikus, előfordulhatnak benne pl. spirálkarokhoz hasonló sűrűsödések, mint azt az *AB Aurigae* esetében láttuk (3.3. ábra).
- A korongnak lehet „légköre”, ami például a sík korong esetében teljesen elnyelheti a csillagról lapos szögben érkező fényt.
- Ha figyelembe vesszük, hogy a trapézkorong légköre optikailag vékony, akkor már nem csak folytonos színeképet kapunk, hanem emissziós vonalakat is, például a már említett jellegzetes szilikátemissziót $10\ \mu\text{m}$ -nél.
- Amikor a színekép hosszú hullámhosszú ($\lambda \geq 100\ \mu\text{m}$) részét vizsgáljuk, akkor már figyelembe kell venni, hogy a korong legkülső részén a hőmérséklet nem eshet a környezet hőmérséklete alá.
- A rendszer körül burok is lehet, amely szintén befolyásolja a külső rész hőmérsékletét.

Az FU Orionis-jelenség

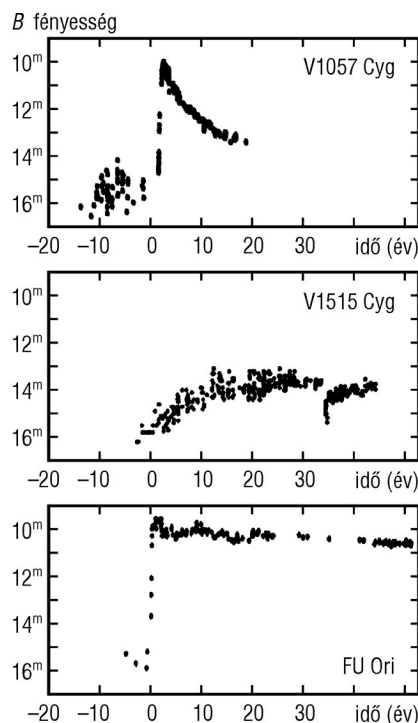
A fiatal csillagok körüli korongok együtt fejlődnek a születő csillaggal, és általában csak hosszabb – tízezer–százezer éves – időskálán változik a szer-

kezetük. Van azonban egy olyan csillagászati jelenség, amelynek jelenleg legelfogadottabb értelmezése szerint a korong belső zónájának fizikai állapota termikus instabilitás miatt rövid idő alatt megváltozik.

A változócsillagok között több évtizede ismert az *FU Orionis* (röviden *FUor*) típus. Olyan csillagokról van szó, amelyek – mint a csoport prototípusa, az *FU Ori* tette 1937-ben – néhány hónap vagy év alatt az optikai tartományban mintegy 5^m -t fényesednek. A 3.7. ábrán látható az elsőként felfedezett három *FUor* fénygörbéje (nem minden ma ismert *FUor*nak látják a kitörését, van amelyet a színképe alapján azonosítottak). Az egyik klasszikus *FUor*, a *V1057 Cyg* kitörés előtti színképe azt mutatja, hogy a *FUor* csillagok öse kis tömegű, fősorozat előtti csillag.

Mi lehet vajon az az extra energiaforrás, amely egy fiatal csillag fényességét százszorosára növeli, és ezt fenn is tudja tartani több évtizedig? A jelenlegi válasz szerint a sugárzás fő forrása voltaképpen nem a csillag, hanem az azt körülvevő korong felforrósodott belső része. Az előző fejezetekben már szó volt arról, hogy a korongok saját energiatermelése az anyagbefogáson alapul: a behulló anyag gravitációs energiája a belső súrlódás által hővé alakul át.

Az anyagbehullás mértéke azonban a következő mechanizmus szerint időlegesen százszorosára nőhet: Képzeljük el, hogy egy fiatal csillag korongjának külső részéről egy bizonyos küszöbértéket ($\approx 7 \cdot 10^{-8} M_{\odot}/\text{év}$) meghaladó ütemben hullik befelé az anyag a csillag irányába. Az átlagot meghaladó behullási ráta oka lehet például, hogy a korong egy kiterjedt sűrű burokba van ágyazva, ahonnan folyamatosan friss anyag érkezik. A korong fősíkjában a hőmérséklet ekkor még viszonylag alacsony, ezért a belső súrlódást okozó turbulens mozgások sebessége sem túl nagy (egy kicsit olyan a helyzet, mint amikor



3.7. ábra. A legkorábban felfedezett három *FU Orionis* típusú csillag fénygörbéje

a vízforralás kezdetén a víz még mozdulatlan az edényben). Ha azonban a belső súrlódás nem eléggé jelentős, akkor nem is lesz képes az összes behulló anyag perdületét a szükséges mértékben lecsökkenteni. Így az anyag egy része nem éri el a csillag felszínét, hanem a korong belső zónájában (tipikusan $1/4$ AU-n belül) „parkoló pályára” kerül.

Ahogy egyre több anyag gyűlik össze a belső részekben, a korong egyre átlátszatlanabbá válik a saját hőszugárzása számára is. Ez a hűtési folyamatok kisebb hatékonyságához, következésképpen a korong hőmérsékletének emelkedéséhez vezet. Bár ez folytonos lassú folyamatként kezdődik, drámaian megváltozik a helyzet, mielőtt a korong belső hőmérséklete eléri a 2000 – 3000 K-t. Ekkor ugyanis a gáz átlátszósága (és ezzel együtt hűlési képessége) nagyon érzékenyen kezd függeni a hőmérsékletétől. Ha valamely kis elemi gáztér fogatnak a véletlenszerű ingadozások következtében egy kicsivel is megnő a hőmérséklete, az az átlátszóság olyan mértékű csökkenéséhez vezet, amelynek következtében a hőmérséklet rohamosan tovább nő. Az anyag hőmérséklete rövid idő alatt eléri a $11\,000$ K-t, és ekkor a hidrogéngáz ionizálódik. Ha pedig egy kis elemi gázcella hőmérséklete véletlen módon kicsit csökken, akkor ezzel a hő további kisugárzásának lehetősége megnő, és a hőmérséklete hirtelen jelentősen csökken. Ennek az instabilitásnak köszönhetően a gáz szétválik két fázisra: egyik része forró és ionizált, másik része hidegebb és semleges állapotú lesz.

Az instabilitás elsőként a korong legbelső területein „kapcsol be”, így ott egy ionizált, forró gyűrű alakul ki. Ez – hasonlóan egy klasszikus HII zónához – ionizációs frontot hoz létre, amely kifelé halad és további területeket ionizál. A front mögötti területen a magas hőmérséklet következtében a mozgás egyre turbulensebbé válik (mint amikor az edényben melegedő víz megközelíti a forráspontot). Ezért megnő a belső súrlódás, hatékonyabbá válik a perdület kijuttatása, és drámai módon megnő a csillag felszínét elérő anyag mennyisége. Az ionizációs front mögötti terület ontja magából a sugárzást, és ahogy nő az ionizált terület, úgy nő a rendszer összfényessége is. A külső megfigyelő ezt a fényességnövekedést észleli FU Orionis típusú kitörésként [7.].

A kitörés azonban nem tart örökké. A kifelé futó ionizációs front előbb-utóbb eléri a korong hidegebb, külső részeit, ahol már nem tud újabb területeket ionizálni. A front mögött pedig lassan kiürül a felhalmozott anyagraktár, a parkoló pályán keringő anyag a csillag felszínére hullik. Ezért a korong átlátszóbbá válik, és végül nem képes fenntartani a magas hőmérsékletet a front mögött sem. A termikus instabilitás miatt ekkor a korong belső része fázisátmenet-szerűen visszatér egy hideg, semleges állapotba, és a kitörés véget ér. Egy aktív időszak időtartama mintegy 100 év, és a modell logikájából következik, hogy a kitörés többször ismétlődhet.

Az FU Orionis jelenség példa arra, hogy a csillagkörüli korongok rövid időskálájú változásokat is képesek mutatni. Meg kell persze jegyezni, hogy a kitörésben voltaképpen csak a korong legbelső része vesz részt (nagyjából 0.25 AU sugárig), míg a külső részeket gyakorlatilag nem is befolyásolja az, ami odabent zajlik. Újabban több mérés is utal arra, hogy a fiatal csillagra folyamatosan hulló anyag mennyisége kisebb, mint azt korábban gondolták. Ha ez beigazolódik, akkor elképzelhető az is, hogy a csillag a végső tömegének legnagyobb részét az FU Orionis-szerű aktív időszakok során gyűjti össze.

Vannak egyéb fiatal változócsillagok is, amelyek fényességváltozását talán szintén a korongban végbemenő megnövekedett anyagbefogás számlájára lehet írni. Az *EX Lupi* típusú csillagok hasonló kifényesedéseket produkálnak, mint az FU Ori-objektumok, de itt a fellángolás időskálája rövidebb (néhány hét–hónap), gyorsabban be is fejeződik, majd néhány éves skálán újra aktivizálódik a csillag. S végül vannak olyan közönséges T Tauri csillagok is, amelyek fényváltozásakor a mért színek változása az akkréció rövid időskálájú ingadozásaira utal.

2004 elején nagy izgalmat keltett mind az amatőrök, mind a szakcsillagászok között, hogy az Orion-köd szomszédságában egy halvány csillag váratlanul kifényesedett. E cikk megírásakor még nem lehet tudni, hogy a kitörés az FU Orionis vagy az EX Lupi osztályba sorolandó-e. Az optikai felvételen (13. kép a színes mellékletben) azonban jól látszik, hogy a forrás egy kis ködöt világít meg, amely Reipurth és munkatársai szerint voltaképpen egy korábbi anyagkifúvás által a molekulafelhőből kivájt üreget tölt ki [8.]. Az efféle anyagkifúvások már önmagukban is jelzik a korongok létezését, s a kitöréssel együtt pedig már biztosra vehető, hogy ennek a fiatal csillagnak a fejlődése is az őt körülvevő koronggal szoros kapcsolatban zajlik.

Kitekintés

A fiatal, főszorozat előtti csillagok körüli korongok vizsgálata nagy érdeklődésre tart számot. A korongok létezése magyarázatot ad a fiatal csillagok számos sajátosságára (pl. infravörös színkép), vizsgálatukból következtethetünk a Nap életének korai időszakaira, és természetes módon elvezetnek a bolygórendszerek kialakulásához is. Nem kétséges, hogy a korongok részletes tanulmányozása a kulcs mind a csillagok, mind a bolygók keletkezésének megértéséhez. A korongok léte segít megérteni a fiatal csillagok változásainak egy részét is. Az irreguláris fényváltozást mutató *UX Ori* típusú csillagokat például olyan rendszerekként képzeljük el, ahol a központi objektumot egy többé-kevésbé éléről látszó korongon keresztül látjuk, és a korongban kerin-

gő nagyobb sűrűségű csomók („felhők”) fényelnyelő hatása okozza a csillag fényváltozását. A korábbiakban tárgyalt FU Orionis jelenség pedig példa arra, hogy a korong maga is aktív változásra képes.

A csillagok fejlődése során a korong tömege csökken, gázkomponense eltűnik, és mire eléri a fősorozatot, már csak egy átlátszó porkorong marad belőle. Ebben a fejlődési fázisban várjuk a bolygók kialakulását is. A porkorong azután még minden bizonnyal sokáig létezhet a bolygórendszerrel együtt. A szakirodalomban az ilyen objektumokat az elsőként felfedezett eset után *Vega típusú korongként* emlegetik.

Irodalom

- [1.] McCAUGHREAN, M. J.–O'DELL, C. R.: *Astronomical Journal*, 1996, **111**, 1977. o.
- [2.] FUKAGAWA, M. és társai: *Astrophysical Journal*, 2004, **605**, L53. o.
- [3.] BLAKE, G. A.–BOOGERT, A. C. A.: *Astrophysical Journal*, 2004, **606**, L73. o.
- [4.] TÓTH L. VIKTOR–ÁBRAHÁM PÉTER.: A „hideg tekintetű” ISOPHOT. *Meteor Csillagászati Évkönyv 2001*, 260. o.
- [5.] P. KISS CSABA–ÁBRAHÁM PÉTER: Az infravörös égi háttér. *Meteor Csillagászati Évkönyv 2004*, 216. o.
- [6.] MALFAIT, K. és társai: *Astronomy and Astrophysics*, 1998, **332**, L25. o.
- [7.] BELL, K. R.–LIN, D. N. C.–HARTMANN, L. W.–KENYON, S. J.: *Astrophysical Journal*, 1995, **444**, 376. o.
- [8.] REIPURTH, B.–ASPIN, C.: *Astrophysical Journal*, 2004, **606**, L119. o.