

4. félévi beszámoló

Anyiszonyan Artúr (benyakrik05@gmail.com)

Részecskefizika és Csillagászat PhD program

Témavezető: Dr. Sándor Zsolt

A dolgozat címe: Orbital evolution of planets through interactions with the protoplanetary disc

1 Bevezetés

A kitűzött kutatási cél a bolygók korai pályafejlődésének vizsgálata volt. Erre a fejlődésre döntő hatással van a csillag körüli korong, amelyből maguk a bolygók is születnek. A kiindulópont ezért a protoplanetáris korong modellezése volt.

A korong kezdeti állapotának meghatározása, amely csak bevezetésül szolgálna az eredetileg kitűzött kutatási tervnek, önálló problémává nőtte ki magát. A bolygó-korong kölcsönhatásokkal foglalkozó vizsgálatok többnyire valamilyen a priori korongstruktúrát feltételeznek. Azok a vizsgálatok pedig, amelyek a molekuláris felhőmagok kollapszusával - így a csillag-korong rendszerek kialakulásával - foglalkoznak, többnyire megállnak a folyamat egy korai fázisánál, amelyből még nem lehet közvetlenül következtetni a kollapszus eredményeként kialakuló rendszer jellemző paramétereire.

A fenti okok miatt az eddig elvégzett vizsgálataim célja az volt, hogy az összeomló felhőmag jellemzői alapján állítsak egy fel egy korongmodellt, amelyben később a bolygókezdemények dinamikája nyomon követhető lesz.

2 Az előző három félévben elért kutatási eredmények összegzése

Az első félévben megismerkedtem a téma alapvető szakirodalmával. Az olvasottak alapján úgy döntöttem, hogy megpróbálok pontosabb képet alkotni a molekuláris felhőmagok kollapszusának menetéről, és a felhőmag illetve a belőle kialakuló csillag-korong rendszer jellemzői közötti összefüggésről. A felhőmag modelljéül az elterjedt Bonnor-Ebert gömböt választottam, amely olyan izotermikus, sztatikus gázgömb, melyben a gravitációt a gáznyomás gradienséből származó erő ellensúlyozza. E gömböket "fálnak" (valamilyen egyéb közegnek) kell határolnia, ellenkező esetben a sugár és tömeg is végtelen nagy. E jellemzőjük miatt a Bonnor-Ebert gömbök közvetlenül érdektelen modellnek tűnhetnek, azonban

egy megfigyelt sötét ködök (extinkcióból számított) sűrűségeloszlása alapján a ködök meglepően jól közelíthetők a Bonnor-Ebert gömb modelljével.

A Bonnor-Ebert gömbök jellemzője, hogy ha a centrumbeli és a peremhez tartozó sűrűségérték aránya meghalad egy kritikus értéket (ez kb. 14.1), akkor a gömb instabillá válik a radiális perturbációkkal szemben, ami gravitációs kollapszushoz vezet. Az első félév folyamán a Bonnor-Ebert gömbök gömbszimmetrikus összeomlását vizsgáltam. Ehhez egy Python-programot készítettem, amely a mozgásegyenleteket a Godunov-séma alapján integrálja. A programot a későbbiekben a többdimenziós modelleket alkalmazó programok validálásához terveztem felhasználni.

A második félév folyamán forgó molekulafelhő tengelyszimmetrikus kollapszusának vizsgálatát kezdtem el. Ebből a célból egy olyan Python-programot készítettem, amely egy kétdimenziós rácson vizsgálja a saját gravitációja és nyomása hatásának kitett gáztömeg időbeli fejlődését. Az egyszerűség kedvéért a vizsgált gáz egy henger alakú tértartományban foglal helyet, a rács a henger szimmetriatengelyére - a gáztömeg forgástengelyére - illeszkedő síkban található négyzet. A kezdeti állapotban a hengerbe írt gömb belsejében a gáz sűrűségeloszlása egy instabil Bonnor-Ebert gömbének megfelelő, míg a gömb és a henger felszíne közötti tartományt homogén tömegeloszlású gáz tölti ki. A gáztömeg a kezdőpillanatban merev testként forog. A program a Godunov-séma alapján integrálja a mozgásegyenleteket. A gravitációs potenciál számítását először az egyes cellák által képviselt gyűrűk járulékaiknak összegzésével végeztem, később ehelyett - a futási idő rövidítése érdekében - egy olyan elemet építettem be a programba, amely a Poisson-egyenletet numerikusan integrálja. Miután a központi sűrűség átlépett egy kritikus értéket, a futtatást a centrum környéki cellák elhagyásával ("átmenő" peremfeltételek felhasználásával) folytattam. Amikor a kollapszus kellőképpen előrehaladott állapotba került, az addig használt rács centrumhoz közel eső negyedében megkésztettem a felbontást, és (a korábbi ciklus eredményeit külső peremfeltételként felhasználva) újból elvégeztem a futtatást. Ezt az eljárást terveztem folytatni még néhány cikluson át, hogy a korongot kellően felbontsam.

A harmadik félévben a tengelyszimmetrikus kollapszust leíró programot javítottam, és futtattam újabb ciklusokon át. A szimuláció egy belülről kifelé felépülő korongot eredményezett, amelyben egy kifelé terjedő lökéshullám fékezi le a szimmetriasík mentén spirálózó gáztömegek a centrumhoz való közeledését. Elterveztem a program további korrekcióját is, amelynek során a rácsból elhagyom azokat a cellákat, amelyek kívül esnek a hengerbe írt gömbön, így a program ténylegesen egy Bonnor-Ebert gömb kollapszusát írja majd le, és működése (perdiületmentes kezdőállapotot választva) validálható lesz az egydimenziós modellből számított eredményekkel való összevetés révén. Ezt a korrekciót még hajtottam végre.

A vizsgált problémát egy másik irányból is megközelítettem: megpróbáltam a kollapszus végállapotát meghatározni a folyamat nyomon követése nélkül. Ehhez feltételeztem, hogy egy vékony, izotermikus korong alakul ki, amelyben a gáz minden része körpályán kering, és az eredetivel azonos impulzuszórával rendelkezik. Az így kapott korongmodell összevethető lesz a kollapszus folyamatát leíró modellből számított végállapottal. Meghatároztam a korong szerkezetét leíró egyenleteket, és azokat olyan formára transzformáltam, amelyben numerikus megoldásuk lehetővé válik. A forgó Bonnor-Ebert gömbre mint kezdeti állapotra való alkalmazásra azonban a félév során már nem maradt időm, ezt a negyedik félévben végeztem el.

3 Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

A félév során folytattam az előző félévben elkezdett vizsgálatot, amely arra irányult, hogy a forgó Bonnor-Ebert gömbök kollapszusa nyomán keletkező protoplanetáris korongok jellemzőit a kollapszus nyomon követése nélkül határozzuk meg.

Bizonyos feltételezések mellett a forgó Bonnor-Ebert gömbök gravitációs kollapszusa nyomán keletkező protocsillag-korong rendszer anélkül is vizsgálható, hogy a kollapszus folyamatát végigkövetnénk. A feltételezések az alábbiak:

- a kollapszus izotermikus,
- a rendszer tengelyszimmetriája a kollapszus során fennmarad,
- az egyes gázzrészek impulzusmomentuma megőrződik.

A ténylegesen lezajló kollapszus során a fenti feltételek némelyike - gyakran mind a három - sérül. A sűrűség növekedése egy ponton saját sugárzására átlátszatlaná teszi a központi tartományt, így annak hőmérséklete növekedni kezd. A mágneses mező jetek és bipoláris kiáramlások révén az impulzusmomentum jelentős részét "vonja ki" az összeomló felhőmagból, ha pedig a mágnesezettség gyenge, a korongban nem-tengelyszimmetrikus struktúrák alakulnak ki. Azonban a modell vizsgálata mégsem érdektelen, mert bizonyos esetekben jó közelítést jelenthet a gáztömeg azon részére, amely kezdetben a forgástengelytől távol keringett, és amelyből később a korong külső tartománya épül fel. A korong e tartománya - éppen azért, mert a protocsillagtól távolabb helyezkedik el, így kevésbé van kitéve a csillag akkréciójának - por- és gázforrásként szolgálhat a bolygókeletkezés számára.

A fenti feltevések mellett a kialakuló korong szerkezete az alábbi egyenletekkel írható le (ω -val jelölve a Bonnor-Ebert gömb szögsebességét):

$$\frac{d\Omega}{dr} = \frac{\omega}{r \cdot I(j)} \cdot \Sigma - \frac{2\Omega}{r}$$

$$\frac{d\Sigma}{dr} = \frac{1}{c_s^2} \left(r\Omega^2 - \frac{dU}{dr} \right) \Sigma$$

Az $I(j)$ függvényt a kezdeti állapot definiálja. Ha $\rho_0(r)$ jelöli a Bonnor-Ebert gömb sűrűségét a középponttól mért távolság függvényében, akkor

$$I(j) = \int_0^{\sqrt{R_{BE}^2 - \frac{j}{\omega}}} \rho_0 \left(\sqrt{\frac{j}{\omega} + z^2} \right) dz$$

A $\rho_0(r)$ függvény nem adható meg zárt alakban, de jó közelítést kaphatunk, ha bevezetjük az alábbiakat:

$$k = \sqrt{\frac{4\pi G \rho_0(0) \mu m_{proton}}{k_B T}}$$

$$F(\xi) = \frac{1}{1 + \frac{\xi^2}{6} + \frac{\xi^4}{180} \cdot \frac{1+4\xi^2/189}{1+\xi^2/27+\xi^4/4115}}$$

Ezek segítségével $\rho_0(r)$ így közelíthető:

$$\rho_0(r) = \rho_0(0) \cdot F(kr)$$

A kezdeti Bonnor-Ebert gömbhöz hasonlóan a végállapotban is fel kell tételeznünk, hogy a rendszert valamilyen külső “fal” (pl. jóval kisebb sűrűségű gáztömeg) határolja. A vizsgálat során azt feltételeztem, hogy a korong ugyanaddig terjed ki, ameddig a kezdeti Bonnor-Ebert gázgömb.

A szerkezeti egyenletek függvénytranszformáció segítségével jobban kezelhető alakra hozhatók. Az új egyenletek:

$$\frac{d\chi}{dx} = C \cdot W(\chi)(1-x)e^{\sigma(x)}$$

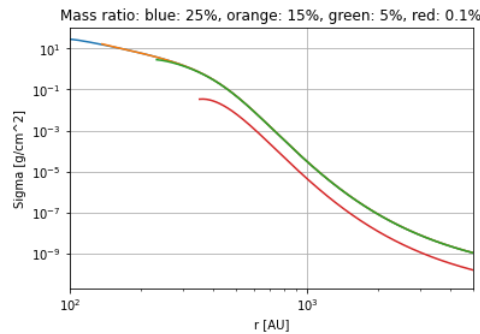
$$\frac{d\sigma}{dx} = \gamma \left(\frac{\zeta(\chi)}{(1-x)^2} - \frac{\nu\beta(1-\chi^{2/3})^2}{\alpha(1-x)^3} \right)$$

Itt α, β, γ értékét és a $W(\chi), \zeta(\chi)$ függvényeket a Bonnor-Ebert gömb $\frac{\rho_0(0)}{\rho_0(R)}$ sűrűségaránya határozza meg, ν pedig a gömb forgási és gravitációs kötési energiájának aránya. A második egyenlet a gravitációs tag közelítésével adódott. A korong peremén $x = 0$, a centrumban $x = 1$. Az egyenleteket a $\chi(0) = 0$, $\sigma(0) = 0$ kezdeti feltételekkel kell integrálni.

A C konstansnak különböző értékek adhatók aszerint, hogy milyen feltételeket írunk elő a “külső” és a “belső” korong találkozásának helyén. Egy lehetséges módszer C értékének rögzítésére, ha megadjuk, hogy az össztömeg mekkora hányada jut a “külső” korongra, és feltesszük, hogy a “külső” korong belső részén a centrifugális gyorsulás dominál a nyomásgradiensből eredő gyorsulás felett, azaz lényegében kepleri keringés történik.

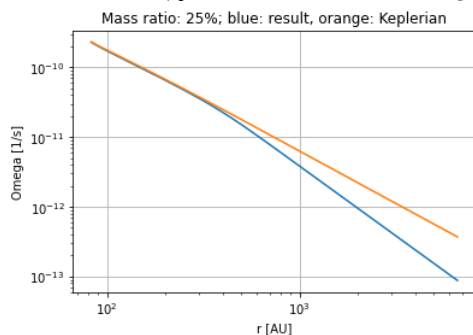
Az egyenletrendszer integrálásához egy Python-programot készítettem. A program bekéri a kezdeti állapot jellemző paramétereit illetve a protocsillag és a “belső” korong tömegének az össztömeghez mért arányát, majd C különböző értékeire integrálja a szerkezeti egyenleteket. A program addig változtatja C értékét, amíg a keringés közel keplerivé nem válik a “külső” és a “belső” korong határán.

Az alábbi ábra néhány reprezentatív felületisűrűség-profilt mutat. A Bonnor-Ebert gömb tömege minden esetben $1 M_{\odot}$ volt, hőmérséklete 15 K, jellemző sűrűségaránya $\frac{\rho_0(0)}{\rho_0(R)} = 20$. Ebben az esetben $R \approx 6614$ AU. A forgási és a gravitációs kötési energia aránya $\nu = 0.01$. A “külső” korong tömege az egyes esetekben az össztömeg 25, 15, 5 illetve 0.1 százaléká. Az ábra tanúsága szerint a tömegarányra a profil alakja kevésbé érzékeny.



A szögsebesség-profil az alábbi ábra mutatja abban az esetben, amikor a külső korong tömege az össztömeg 25 százaléká. A “külső” korong belső határa

ekkor 89.2 AU-nál található. Az ábrán szerepel a kepleri szögsebesség-profil is. Amint látható, $r \lesssim 300$ AU esetén a korong lényegében kepleri módon kering.



A fent leírt eredményeket a félév végén tartott tanszéki szemináriumon ismerttettem, és a kollapszus folyamatát leíró modelltől számított eredményekkel való összevetés után tervezem közzétenni.

4 További tevékenységek

Publikációk: -

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben: A félév folyamán az ELTE TTK “Radio astronomy 2.” illetve “Fejezetek a többes csillag-és bolygórendszerek elméleti és megfigyelési kérdéseiből II.” c. kurzusait végeztem el.

Konferenciák az aktuális félévben: -

Oktatási tevékenység az aktuális félévben: A félév során a csillagász szakos hallgatók számára tartottam két gyakorlati kurzust “Az elméleti asztrofizika matematikai alapjai 1.” illetve “Az elméleti asztrofizika matematikai alapjai 3.” címmel (2-2 kredit).