

1. 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

*Bevezetés:*

A kutatás célja, hogy feltárja a fiatal csillagok körüli akkréciós korongokban kialakuló bolygókezdemények, majd bolygók pályafejlődését, amelyeket a korong és az abban születő égitestek közötti kölcsönhatások idéznek elő. A probléma vizsgálata elvezethet az ismert exobolygó-rendszerek felépítésének megértéséhez.

A vizsgált dinamikai probléma megoldása magában foglalja a központi csillag és az egyes bolygókezdemények akkréciójának, valamint a korong állapotát leíró függvények időbeli változásának nyomkövetését egy kezdeti állapottól egészen az akkréciós korong eltűnéséig. A vizsgálat első lépése a kezdeti állapot megfelelő kitűzése. Ezt követheti a megfelelő dinamikai modell kiválasztása, azaz a releváns fizikai kölcsönhatások megállapítása és a mozgásegyenletek felírása. A probléma megoldásához a mozgásegyenletek numerikus integrálása vezet el.

*Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése:*

A problémafeldolgozást a szakirodalom összegyűjtésével és vizsgálatával kezdtem. Az akkréciós korong dinamikájáról az utóbbi évtizedekben számos cikk és monográfia született, amelyek a korong fejlődését a viszkózus fluidumok mozgásegyenleteivel írják le. Az egyenletekben megjelennek a központi csillag tömegvonzásának – és esetenként a korong öngravitációjának – megfelelő tagok, egyes modellekben pedig a mágneses mező és a fluidum kölcsönhatása is. Általános probléma a turbulens viszkozitás számszerű jellemzése (Ny. I. Sakura és R. A. Szunyajev elterjedt modelljében ez az  $\alpha$ -paraméter értékének rögzítését jelenti).

Az említett írások közös jellemzője, hogy a korong fejlődését egy olyan kezdeti állapotból kiindulva vizsgálják, amelyben a korong nem vagy alig gyűjt anyagot a kozmikus környezetből, azaz a csillagot és a korongot szülő felhőmag-kollapszus lényegében már lezajlott. A vizsgált probléma szempontjából indokoltnak látszik a fejlődést annak egy korábbi fázisából nyomkövetni, nevezetesen a kollapszus kezdetétől. Ez lehetőséget ad a születő korong jellemzőinek leírására és az anyagbegyűjtés térbeli eloszlásának meghatározására, ezáltal jobban megbecsülhetővé válik a kialakuló bolygókezdemények helyének kezdeti eloszlása.

A felhőmagok kollapszusának szintén sok évtizedes szakirodalma van, de a kollapszus menetéről alkotott kép máig vita tárgya. Ezért a problémamegoldás első lépéseként a felhőkollapszus modellezését kezdtem el. Kiindulásképpen egy nulla perdületű, izotermikus, öngravitáló gázgömb (Bonnor-Ebert gömb) összeomlását vizsgáltam meg numerikus eszközökkel. Ilyen esetben természetesen nem keletkezik korong. E modell vizsgálatának alapvető célja az, hogy képet alkossunk az összeomlás kezdeti fázisáról (amelyben a perdület még nem játszik jelentős szerepet), és validálhassuk a későbbi, bonyolultabb modelleket.

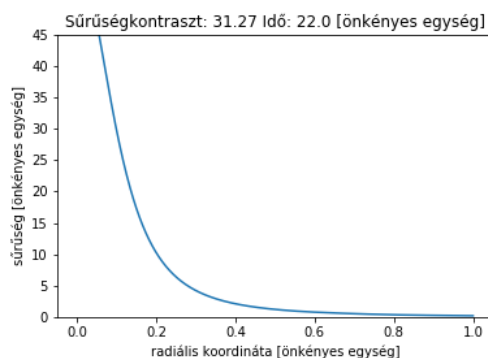
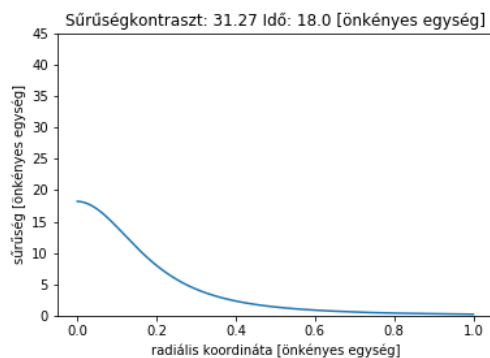
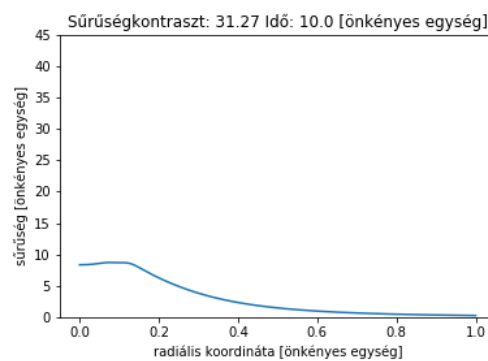
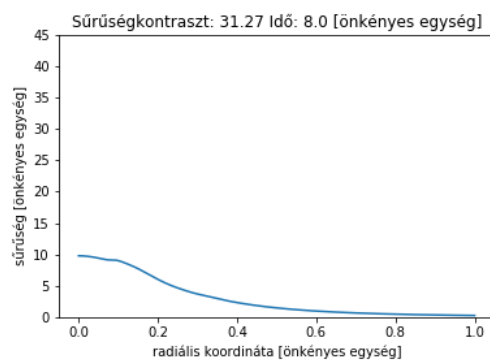
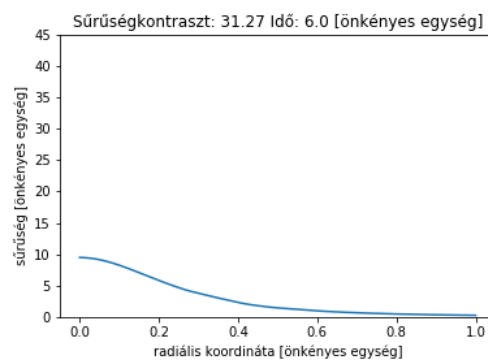
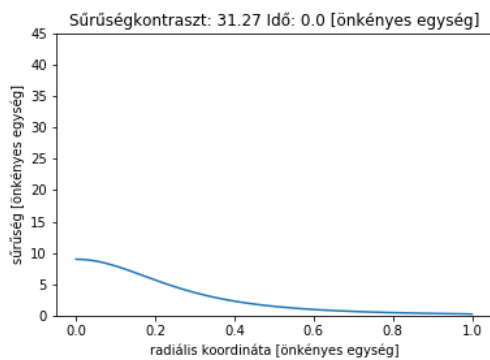
Az izotermikus, öngravitáló, sztatikus gázgömb sűrűségprofilja zárt analitikus formában nem írható fel, de numerikusan könnyen előállítható, és lényegi jellemzői ismertek. A sűrűség szigorúan monoton csökken a szimmetriacentrumtól távolodva, de csak a végtelenben válik nullává. Véges kiterjedésű gázgömb ezen profil csonkolásával állítható elő, amely a megfelelő nyomást kifejtő külső „fal” felállításával egyenértékű. Ha a csonkolás helyét a centrumtól távolítjuk, azaz növeljük a sűrűségkontrasztot a centrum és a perem között, akkor egy ismert ponton a gázgömb instabillá válik, és a sűrűségperturbációk kollapszushoz vezetnek.

A numerikus vizsgálatához két Python-programot írtam. Az egyik megadja a Bonnor-Ebert gömb sűrűségét a centrumtól mért távolság függvényében. A másik program a mozgásegyenleteket integrálja. A szimuláció 1 térdimenziót vett figyelembe. A gázgömb dinamikáját a gravitációval

kibővített Euler-egyenlettel írtam le. A göbbszimmetria miatt a gravitáció figyelembevétele egyszerűen a héjtételek segítségével történik. A fluidum termodinamikai állapotjelzőire az ideális gáz állapotegyenletét írtam elő. Izotermikus kollapszust feltételeztem, így csupán két mozgásegyenletet kellett integrálni.

A mozgásegyenleteket integráló program a tér „véges térfogat” (finite volume) diszkretizációjára épült. A centrumban és a peremen is „tükröző” határfeltételt alkalmaztam szellemcellák segítségével. (A peremen a továbbiakban realiztikusabb határfeltételeket fogok kiszabni.) A mozgásegyenleteket „megmaradási” alakban (conservation form) írtam fel a sűrűsége és az impulzussűrűségekre. Az inhomogén parciális differenciálegyenlet-rendszer numerikus megoldását az „operátorszeletelés” (operator splitting) módszerével végeztem. Minden időbeli lépésnél előbb a homogén advekcións egyenletrendszerrel vizsgáltam, Godunov módszerével számítva ki a sűrűség- és az impulzussűrűség új eloszlását. (A Godunov sémában megjelenő Riemann-problémákat Roe módszerével oldottam meg.) Ezután vettem figyelembe a gömbi koordináta-rendszerből és a gravitációból eredő inhomogenitásokat (forrástagokat) oly módon, hogy cellánként egy-egy közönséges differenciálegyenlet-rendszert írtam fel, majd negyedrendű Runge-Kutta módszerrel állítottam elő a következő időponthoz tartozó értékeket.

A programot úgy validáltam, hogy kezdeti feltételként a perem közelében kissé perturbált stabil és instabil Bonnor-Ebert gömböket adtam meg, majd követtem a gömbök dinamikáját néhány „hangáthaladási időn” (sound-crossing time) át. A kapott eredmények megfelelnek a várakozásnak: a stabil gömbök tartósan oszcillálnak, az instabil gömbök viszonylag hamar kollapszusba kezdenek. Az alábbi ábrák az utóbbi esetet illusztrálják.



A szimuláció stabilnak és kellően pontosnak tűnik. Kivételt képeznek az összeomló gömbök a kollapszus előrehaladott fázisában, itt a program numerikusan instabillá válik. Ennek orvoslását „nyelő” (sink) beépítésével tervezem, amelyet a központi csillag és a bolygók modellezése egyébként is indokol.

A továbbiakban 2 térdimenziót vizsgáló szimulációt fogok készíteni, feltételezve, hogy a teljes perdület nem nulla, de az összeomlás során a rendszer mindvégig forgásszimmetrikus. Ebben az esetben már várható az akkréciós korong képződése, és vizsgálhatóvá válik a csillag és a korong tömegarányának és a korong jellemzőinek időbeli változása, legalábbis amíg az izotermikusság feltétele közelítőleg érvényben van.

*Publikációk: -*

*Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben:*

A félév során az ELTE TTK „Asztrosztatika I.” illetve „Linear and Non-linear MHD Waves” c. kurzusait végeztem el.

*Konferenciák az aktuális félévben: -*

*Oktatási tevékenység az aktuális félévben:*

A félév során a csillagász szakos hallgatók számára vezettem gyakorlatot („Elméleti asztrofizika gyakorlat”, 1 kredit).