

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra softwarového inženýrství
Obor: Aplikace softwarového inženýrství



Vliv prstýnků na orbitální rychlost hvězd v prstencových galaxiích

Ring Influence on the Orbital Velocity of Stars in Ring Galaxies

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Zuzana Hodbořová
Vedoucí práce: prof. Ing. Goce Chadzitaskos, CSc.
Rok: 2023

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra softwarového inženýrství

Akademický rok 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Zuzana Hodbořová
Studijní program: Aplikace přírodních věd
Obor: Aplikace softwarového inženýrství
Název práce česky: Vliv prstýnků na orbitální rychlost hvězd v prstencových galaxiích
Název práce anglicky: Ring Influence on the Orbital Velocity of Stars in Ring Galaxies

Pokyny pro vypracování:

1. Udělejte rešerši problému orbitálních rychlostí.
2. Vyberte tři nejlépe popsané prstencové galaxie.
3. Simulujte různá rozdělení hustoty, která odpovídají reálným orbitálním rychlostem pro symetrický model.
4. Naprogramujte animaci těchto dějů.

Doporučená literatura:

- [1] JONES, B. and SAHA, P. *The Galaxy: Notes for Lecture Courses ASTM002 and MAS430* [online]. Chapters 1–5. London: Queen Mary University of London, 2007 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: https://www.astro.umd.edu/~richard/ASTR0620/QM_chap1.pdf.
- [2] Dark matter. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_matter.
- [3] List of ring galaxies. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_ring_galaxies.
- [4] Milky Way. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way
- [5] YOSHIKI, S. Rotation and Mass in Milky Way and Spiral Galaxies. In: *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69, 2017.
- [6] CHADZITASKOS, G. On the influence of rings on orbital velocities. arXiv:2106.07325v1 [astro-ph.GA]. September 20, 2021.

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

prof. Ing. Goce Chadzitaskos, CSc.

Katedra fyziky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště konzultanta:

–

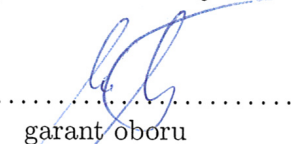


.....
vedoucí práce

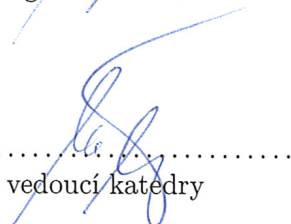
Datum zadání bakalářské práce: 15. 10. 2021

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. 7. 2022

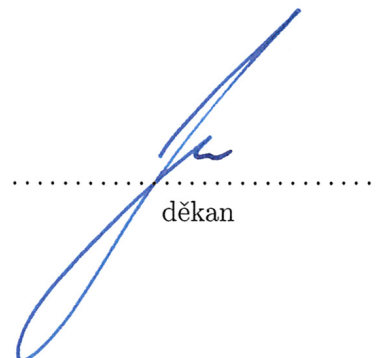
Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.



.....
garant oboru



.....
vedoucí katedry



.....
děkan

V Praze dne 15. 10. 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Děčíně dne

.....
Zuzana Hodbořová

Poděkování

Děkuji panu prof. Ing. Gocemu Chadzitaskosovi, CSc. za cenné rady a vedení mé bakalářské práce a paní Mgr. Daně Majerové, Ph.D. za přínosné příspěvky a pomoc v programovacím jazyce MATLAB.

Zuzana Hodbořová

Název práce:

Vliv prstýnků na orbitální rychlost hvězd v prstencových galaxiích

Autor: Zuzana Hodboďová

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Aplikace softwarového inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Goce Chadzitaskos, CSc.

Katedra fyziky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze

Konzultant:

Abstrakt: V mé bakalářské práci se snažím ukázat, že pomocí gravitace způsobené prstýnkou, lze částečně vysvětlit problém orbitálních rychlostí, které se nezměňují se vzdáleností od středu galaxie dle Keplerova zákona. Na modelech zpracovaných v programu MATLAB demonstruji průběh gravitačního potenciálu, průběh centrálních sil a z nich vyplývajících orbitálních rychlostí. Z výsledků vyplývá, že existují místa, kde jsou příspěvky od prstýnků ke gravitační síle záporné, kladné, nebo nulové (podobné tvary křivek potenciálu a pole lze očekávat i u spirálních galaxií). Tento nápad je založen na odlišném průběhu gravitačního potenciálu pro kouli a prstenec.

Klíčová slova: prstencové galaxie, orbitální rychlosti, MATLAB, nebeská mechanika

Title:

Ring Influence on the Orbital Velocity of Stars in Ring Galaxies

Author: Zuzana Hodboďová

Abstract: In my bachelor thesis I try to prove that gravity caused by rings can partly explain the problem of orbital velocities that do not decrease with distance from the centre of the galaxy according to Kepler's law. On models processed in the MATLAB program, I demonstrate the course of the gravitational potential, the course of the central forces and the resulting orbital velocities on a models. The results show that there are places where the contributions from the rings to the gravitational force are negative, positive, or zero (similar shapes of the potential and field curves can be expected for spiral galaxies). This idea is based on the different gravitational potential waveforms for the sphere and the ring.

Key words: ring galaxies, orbital velocities, MATLAB, celestial mechanics

Obsah

Úvod	8
1 Základní pojmy	9
1.1 Gravitační síla	9
1.2 Luminosita	10
1.3 Kosmické rychlosti	11
1.3.1 První Kosmická rychlost	11
1.3.2 Druhá kosmická rychlost	11
1.3.3 Třetí kosmická rychlost	12
1.4 Kosmické teleskopy	12
1.4.1 Hubbleův teleskop	13
1.4.2 Webbův teleskop	15
2 Zkoumané prstencové galaxie	17
2.1 Příklady prstencových galaxií	18
2.2 Hoagův objekt	19
2.3 Kolo od vozu	21
2.4 NGC 7217	22
2.5 NGC 1269	23
3 Návrh	25
3.1 Výběr prostředí	25
3.1.1 MATLAB	26
3.2 Souhrn výsledků dosavadních výzkumů	26
4 Implementace	28
4.1 Postup řešení a výpočty	28
4.2 Výstupy	29
4.2.1 Hoagův objekt	29
4.2.2 Kolo od vozu	30
4.2.3 NGC 7217	30
4.2.4 NGC 1291	31
4.2.5 Animace	32
Závěr	41
Literatura	42

Úvod

V této bakalářské práci se zaměřuji na detailní analýzu a možný vliv prstýnků na orbitální rychlosti v prstencových galaxiích. Překrytí centrální síly s gravitačními silami vyvolanými prstenci otevírá různé možnosti průběhu orbitálních rychlostí. Tato problematika nabízí širokou oblast zkoumání, kde se setkává centrální síla s gravitačními vlivy prstýnků, což může poskytnout zajímavý pohled na problematiku těchto kosmických struktur.

Prvkem, kterým se budu zabývat, je závislost orbitálních rychlostí na poloze objektů uvnitř prstence a tím, jak se objekt pohybuje kolem jádra galaxie a jak jeho rychlost bude reagovat na proměnlivost gravitačního pole způsobeného právě tímto prstencem. Pro dosažení mého cíle jsem provedla analýzu na základě pěti různých modelů, které jsem vytvořila programového prostředí MATLAB. Tímto způsobem jsem byla schopna vizualizovat průběh potenciálových křivek a také křivek silového pole. Podobné tvary křivek potenciálu a pole lze očekávat i u spirálních galaxií, kde funguje podobný efekt, zejména proto, že rozdíl mezi prstencovými a spirálními galaxiemi není příliš velký, a proto v mé práci také vycházím z výzkumů, které jsou určeny pro spirální galaxie. Mezi mnou zkoumanými prstencovými galaxiemi je tak i jedna spirální galaxie.

Kapitola 1

Základní pojmy

1.1 Gravitační síla

Gravitační síla se pojí s Newtonovým gravitačním zákonem. Ten popisuje gravitaci jako přitažlivou sílu, kterou na sebe působí tělesa v závislosti na svých hmotnostech a vzdálenosti od sebe. Isaac Newton formuloval svůj gravitační zákon na základě analýzy pohybu Měsíce kolem Země, planet kolem Slunce a na základě znalosti Keplerových zákonů.

Formulace Newtonova gravitačního zákona nám říká, že mezi dvěma tělesy o hmotnostech m_1 a m_2 , která můžeme přesně aproximovat jako body, nebo jsou sféricky symetrická (jak vyplývá z Gaussovy věty), na sebe působí gravitační silou, která je přímo úměrná součinu gravitační konstanty a hmotností obou těles a je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti těchto těles. Vzorec pro Newtonův gravitační zákon je

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.1)$$

Kde F_g je gravitační síla, G je gravitační konstanta, m_1 a m_2 jsou hmotnosti prvního a druhého hmotného bodu a r je vzdálenost mezi jejich těžišti.

Gravitační konstanta G (dříve značená řeckým písmenem κ) má hodnotu $G = (6,6742 \pm 0,0010) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$

Gravitační síla není ovlivněna prostředím mezi tělesy, jako je tomu u elektrické, nebo magnetické síly. Její projevy se ukazují až u planetárních rozměrů, je jednou z nejmenších známých působení.

Newtonův gravitační zákon je základním stavebním kamenem klasické fyziky, není ale vhodný pro velmi hmotné vesmírné objekty, a pro rychlosti v jejich blízkosti, jelikož se mohou blížit rychlosti světla (299 792 458 m/s). Pro ty platí přesnější a složitější definice gravitace, a to obecná teorie relativity. Pro mé účely je ovšem postačující klasická teorie. Kvantovou teorii gravitace se zatím nepodařilo vytvořit.

1.2 Luminosita

Luminosita je termín používaný k popisu množství světla emitovaného nebo přijímaného pozorovatelem. Jedná se o jasovou charakteristiku objektu nebo prostoru. Luminosita může odkazovat jak na zdánlivou jasnost, neboli jasnost objektu, tak na absolutní jasnost, tedy jasnost objektu při standardní vzdálenosti. V astronomii se luminosita často používá k popisu jasu hvězd, galaxií a dalších vesmírných objektů. Zároveň se luminosita vztahuje k měření jasu prostoru, jako je například jasnost místnosti.

Výpočet luminosity závisí na konkrétním kontextu a objektu. V případě hvězd se například luminosita často měří v jednotkách zvaných sluneční jasnost ((solar luminosity), není jednotka SI), která je definována jako jasnost Slunce. Pro luminositu se uvádí jednotka watt, avšak u hvězd (kromě Slunce) obvykle používáme jako jednotku zářivý výkon Slunce, kde $L_{\odot} = 3.827 \times 10^{26}$ W (někdy značíme L_s nebo L_0). Výkony jiných hvězd pak poměrujeme touto poměrnou jednotkou.

Luminositu lze vyjádřit pomocí absolutní hvězdné velikosti, tedy

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \sqrt[5]{100}^{M_{\odot} - M} \quad (1.2)$$

Díky známým hodnotám Slunce lze vzorec přepsat do tvaru

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 \quad (1.3)$$

Tento vzorec vyjadřuje závislost mezi svítivostí (L) hvězdy a sluneční svítivostí (L_{\odot}), která je závislá na poměru poloměru (R) hvězdy k poloměru slunce (R_{\odot}) umocněném na druhou mocninu a poměru teploty (T) hvězdy k teplotě slunce (T_{\odot}) umocněném na čtvrtou mocninu.

Pro výpočet luminosity hvězdy se často používá také Stefanův-Boltzmannův zákon, který vztahuje teplotu povrchu hvězdy k její jasnosti. Jeho definice zní *Každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu září, přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty.* Stefanova-Boltzmannova konstanta je $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴.

Vzorec pro výpočet luminosity pomocí Stefanova-Boltzmannova zákona je:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (1.4)$$

kde L je luminosita hvězdy, R je poloměr hvězdy, σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a T je teplota povrchu hvězdy.

Luminosita galaxie je poté množství světla emitovaného galaxií do okolního prostoru. Výpočet luminosity galaxie zahrnuje měření celkového zářivého výkonu galaxie a výpočet jasnosti na jednotku plochy. Vzorec pro výpočet luminosity galaxie je trochu odlišný od výpočtu pro hvězdu

$$L = 4\pi D^2 F \quad (1.5)$$

kde L je luminosita galaxie, D je vzdálenost galaxie a F je zářivý výkon galaxie. Výsledná jednotka luminosity je watt, tedy W .

1.3 Kosmické rychlosti

Kosmické rychlosti jsou rychlosti potřebné k překonání gravitačního působení kosmického tělesa.

Existuje několik kosmických rychlostí, nejčastěji zmiňované jsou první tři.

1.3.1 První Kosmická rychlost

První kosmická rychlost, nebo také kruhová rychlost, je minimální rychlost, kterou potřebuje obíhající těleso v gravitačním poli dosáhnout k zabránění pádu na povrch obíhaného kosmického tělesa, tedy aby obíhalo po kruhové dráze kolem obíhaného kosmického tělesa, přičemž s rostoucí výškou nad jeho povrchem hodnota první kosmické rychlosti klesá. Tedy je to rychlost kruhové oběžné dráhy a já tuto rychlost počítám ve svých modelech. Výchozím vztahem je tvrzení, že dostředivá síla je představována silou gravitační, tedy

$$F_d = F_g \quad (1.6)$$

. Velikost 1. kosmické rychlosti vyplývá ze vztahu

$$v_k = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{\mu}{r}} \quad (1.7)$$

kde v_k je kruhová rychlost, G je gravitační konstanta ($G = (6,6742 \pm 0,0010) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ (Oproti elektrické nebo magnetické síle není gravitační síla nijak ovlivněna prostředím mezi tělesy)), M hmotnost obíhaného tělesa, r vzdálenost středů obou těles (obvykle součet poloměru obíhaného tělesa a výšky trajektorie nad povrchem) a μ je gravitační parametr. Kruhová rychlost tedy nepřímo úměrně závisí na odmocnině vzdálenosti.

Prvním umělým tělesem, které dosáhlo první kosmické rychlosti byl Sputnik 1 (SSSR), který byl na oběžnou dráhu kolem Země naveden 4. října 1957. Obíhal po eliptické dráze ve výšce 227 - 947 km s oběžnou dobou 96 minut.

1.3.2 Druhá kosmická rychlost

Druhá kosmická rychlost, známá také jako parabolická rychlost, je minimální rychlost, kterou se musí obíhající kosmické těleso v gravitačním poli obíhaného kosmického tělesa pohybovat, aby mohlo toto gravitační pole opustit. Obíhající těleso se při ní pohybuje po parabolické trajektorii. Velikost únikové rychlosti vyplývá ze vztahu pro rovnost kinetické a potenciální energie, a tedy dle zákona zachování energie (tj. že energii není možné vyrobit ani zničit, je možné ji jen přeměnit na jiný druh energie) platí, že $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$, po dosazení

$$\frac{1}{2}mv^2 + \left(-G\frac{mM}{r}\right) = 0 + 0 \quad (1.8)$$

a po úpravách vzorec vypadá takto

$$v_p = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = \sqrt{\frac{2\mu}{r}} = \sqrt{2} \cdot v_k \quad (1.9)$$

kde v_p je parabolická rychlost, v_k je kruhová rychlost, G je gravitační konstanta ($G = (6,6742 \pm 0,0010) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$), M je hmotnost tělesa, v jehož gravitačním poli se druhé těleso pohybuje a r je vzdálenost středů obou těles (obvykle součet poloměru obíhaného tělesa a výšky trajektorie nad povrchem), a μ je gravitační parametr. Vzorec má, jak je jasně patrné, stejné proměnné jako v případě vzorce (1.7) pro 1. kosmickou rychlost.

Prvním umělým tělesem, které dosáhlo druhé kosmické rychlosti byla kosmická sonda Luna 1 (SSSR), která byla vypuštěna 2. ledna 1959. Sonda proletěla kolem Měsíce ve vzdálenosti asi 5 000 km a stala se první umělou oběžnicí Slunce.

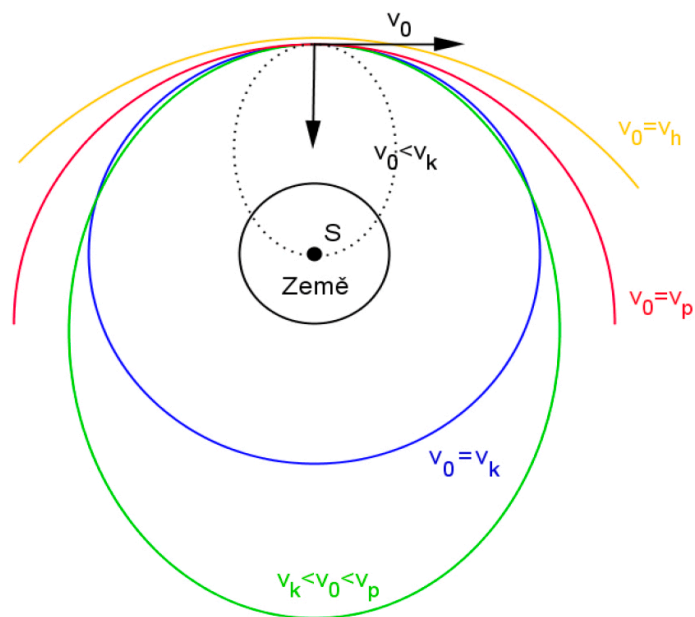
1.3.3 Třetí kosmická rychlost

Třetí kosmická rychlost, neboli hyperbolická rychlost, je rychlost přesahující parabolickou rychlost v gravitačním poli daného kosmického tělesa. Obíhající těleso se při ní pohybuje po hyperbolické trajektorii, v kosmonautice se však k jejímu dosažení využívá gravitačních manévřů, které trajektorii mění. (Gravitační manévr, neboli gravitační prak, je v nebeské mechanice metoda, která určuje, jak využít průletu umělého kosmického tělesa gravitačním polem kosmického tělesa ke změně jeho směru a rychlosti. Nejčastěji se tento manévr používá pro cestování k vnějším planetám Sluneční soustavy, která by jinak byla příliš nákladná, nebo by při použití současných technologií nebyla vůbec možná. Vnější planety jsou všechny planety obíhající kolem Slunce vně pásu asteroidů, tedy plynní obři Jupiter, Saturn, Uran a Neptun).

Prvním umělým kosmickým tělesem, které dosáhlo třetí kosmické rychlosti (po gravitační katapultáži u planety Jupiter v roce 1973) byla kosmická sonda Pioneer 10. Od Země tato sonda odlétala 3. března 1972 rychlostí "jen" 14,5 km/s. O rok později Pioneer 10 následovala kosmická sonda Pioneer 11, která po startu 6. dubna 1973 získala rychlost 14,3 km/s. Tyto rychlosti jsou samozřejmě nižší než hyperbolická rychlost, byly však později zvýšeny pomocí gravitačního praku.

1.4 Kosmické teleskopy

Kosmické teleskopy jsou zařízení umístěné na oběžné dráze Země nebo jiných kosmického těles. Jejich umístění mimo zemskou atmosféru umožňuje pořizovat velmi ostré snímky kosmických těles. Existuje mnoho různých typů těchto zařízení, které se odlišují podle vlnových délek, které jsou schopné pozorovat. Hubbleův teleskop je určen pro pozorování v blízkém ultrafialovém, ve viditelném a blízkém infračerveném spektru (0,1-1,0 μm), podobně jako Webbův teleskop, který je ovšem navržen tak,



Obrázek 1.1: Ilustrace kosmických rychlostí na příkladu planety Země

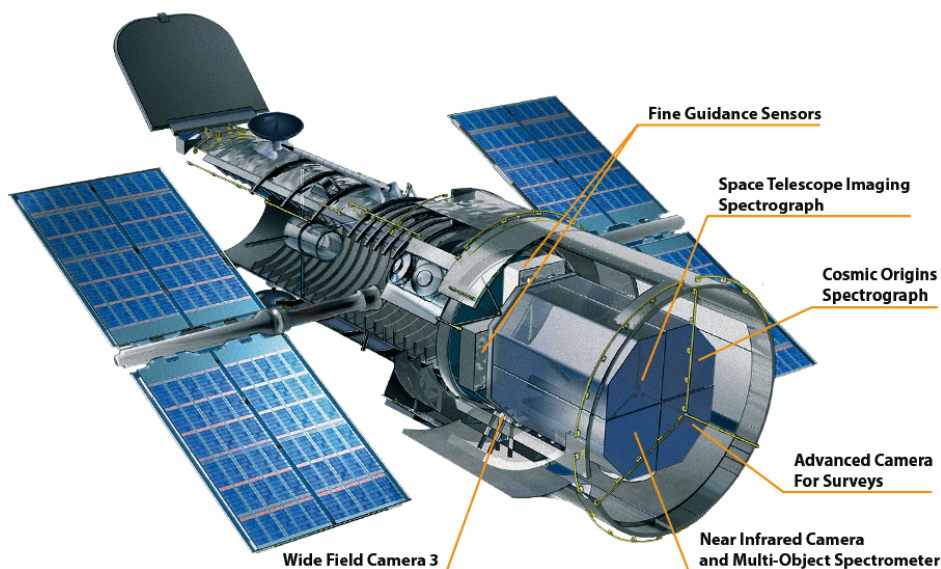
aby byl schopný pozorovat v nižším frekvenčním rozsahu, od dlouhovlnného viditelného světla (červené) po střední infračervené spektrum ($0,6 - 28,3 \mu\text{m}$) než zmíněný Hubbleův teleskop. Fotografie, které v mé bakalářské práci používám, jsou právě z těchto dvou teleskopů, a proto je rozvedu více v následujících dvou podkapitolách.

1.4.1 Hubbleův teleskop

Hubbleův teleskop, neboli anglicky Hubble Space Telescope, ve zkratce HST, je druhý největší astronomický dalekohled, v současné době obíhá Zemi ve výšce přibližně 569 kilometrů. Pojmenován byl po Edwinu Hubbleovi, který ve 20. letech 20. století jako první prokázal rozpínání vesmíru a existenci jiných galaxií, než je Mléčná dráha, a stal se tak otcem současné kosmologie. Pro zajímavost, jeho jménem je pojmenován také jeden z kráterů na Měsíci a planetka 2069. Hubbleův teleskop na oběžnou dráhu Země do výše 614 kilometrů 24. dubna 1990 vynesl americký raketoplán Discovery.

Průměr primárního zrcadla je 2,4 m, průměr sekundárního zrcadla je poté 30 centimetrů, váží 11 600 kg s nominálním výkonem 2400 W. Navzdory všem poruchám které teleskop provázely a havárii raketoplánu Columbia, který měl vykonat servisní misi v roce 2003, se dlouho zdálo, že další raketoplán už se k teleskopu nepošle a ten tak postupně zanikne v hustých vrstvách zemské atmosféry. Život dalekohledu je totiž bytostně závislý na servisních misích, při kterých kosmonauti přivážejí nové přístroje, opravují poruchy, vyměňují gyroskopy nutné k navádění teleskopu, a provádí spoustu dalších úprav a oprav, nutných pro správný chod. Pokud by k servisním

misím nedošlo, postupně by selhali stabilizační setrvačníky a fotovoltaické články, a do deseti let by teleskop přestal pracovat. Na nátlak vědecké komunity ovšem NASA servisní misi znovu zařadila do plánu letů raketoplánů na rok 2008, a po posunu termínu z technických důvodů se start mise STS-125 uskutečnil v roce 2009. Zajímavým faktem je, že raketoplán na své palubě nesl českou vlajku a anglický výtisk Písní kosmických od Jana Nerudy, kterou vzal do vesmíru astronaut Andrew Feustel. Cílem mise STS-125 bylo zajistit funkčnost teleskopu minimálně do roku 2013. Aby mohl být teleskop bezpečně naveden po ukončení své životnosti do hustých vrstev zemské atmosféry kde poté zanikne, byl k němu připojen nástavec „Soft-Capture Mechanism“. S další servisní misí se tedy již nepočítá, ovšem podle predikcí by měl Hubbleův teleskop vydržet v provozu přibližně ještě do let 2030-2040.



Obrázek 1.2: Hubbleův teleskop

Navigační systém teleskopu má tři základní části: setrvačníky RSU (Rate Sensing Unit), reakční kola RWA (Reaction Wheel Assembly), a optické senzory polohy FGS (Fine Guidance Sensors). Optický systém teleskopu je uzavíratelný krytkou pro případ, kdy by například Země prolétala meteorickým rojem. Pokud je krytka otevřena, prochází paprsky nejdříve na primární zrcadlo, od něhož se odráží na sekundární zrcadlo a poté prochází otvorem v primárním zrcadle do přístrojové sekce. Základem této sekce jsou čtyři pozice, jedna je trvale osazena korekční optikou COSTAR (Corrective Optical Space Telescope Axial Replacement), druhá je osazena infračervenou kamerou NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer), ve třetí je spektrograf STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph) a ve čtvrté širokoúhlá kamera ACS (Advanced Camera for Surveys). Mimo tyto čtyři základní pozice je umístěna širokoúhlá planetární kamera WFPC 2 (Wide Field and Planetary Camera 2). Teleskop je schopen pozorovat od blízkého infračerveného záření po ultrafialové záření v rozsahu vlnových délek od 115nm do 1000nm, jak už bylo uvedeno výše. Pořízená data jsou poté nahrávána na pevné médium uvnitř teleskopu. Zajímavostí je, že v počátcích teleskopu se data nahrávala ještě na magnetofonový pásek. Data jsou pomocí antény poté předána družici TDRS (Tracking and Data Relay Satellite) umístěné na nízké oběžné dráze, ze které putují do pozemské stanice

ve White Sands. Hubbleův teleskop přispěl k velkému množství nových poznatků, jako například ke změření Hubbleovy konstanty, nebo ke snímku HDF (Hubble Deep Field), a později druhému HUDF (Hubble Ultra-Deep Field), což jsou snímky vybrané oblasti vesmíru složené ze spousty fotografií, na kterých jsou tisíce galaxií v různých vývojových stádiích. Sledoval také spoustu rodících se hvězd a planet, srážky galaxií a například zachytil i rozpad komety Shoemaker Levy 9 a dopad jejích úlomků na planetu Jupiter. Mezi nejznámější fotografie z Hubbleova teleskopu poté patří např. Sloupy stvoření (Pillars of creation), nebo Orlí mlhovina.

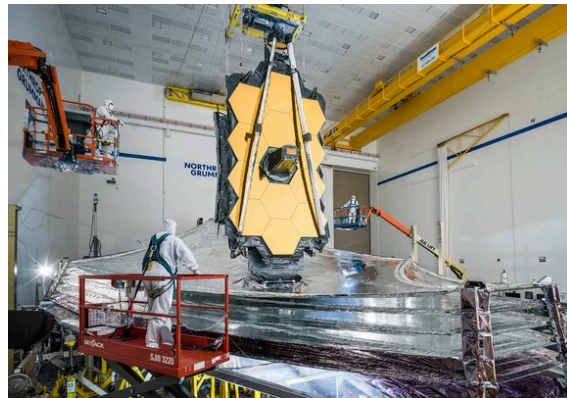


Obrázek 1.3: Pillars of creation

1.4.2 Webbův teleskop

Vesmírný teleskop Jamese Webba, neboli anglicky James Webb Space Telescope, zkratkou JWST, je doposud nejdražší astronomický teleskop, který vznikl ve spolupráci NASA, ESA (European Space Agency) a CSA (Canadian Space Agency). Pojmenován je po Jamesi Edwinu Webbovi, který byl americkým státním úředníkem, druhým ředitelem NASA a sehrál důležitou roli v programu Apollo. Webbův teleskop byl vypuštěn 25. prosince 2021 raketou Ariane 5. Je často označován jako nástupce Hubbleova teleskopu, ovšem zatímco Hubbleův teleskop obíhá okolo Země, Webbův teleskop obíhá vzdálené libračního centrum L2 soustavy Slunce - Země, tedy přibližně 1,5 milionu kilometrů od Země, na opačné straně než je Slunce (v nebeské mechanice je librační centrum v soustavě tří těles rotujících kolem společného těžiště takový bod, v němž se vyrovnávají odstředivé a gravitační síly působící na třetí těleso tak, že toto těleso umístěné v daném bodě nemění svou polohu vůči soustavě. Všechna librační centra se nacházejí v rovině rotace těchto těles, a je jich celkem pět. Vlastnosti libračních center popsal již v roce 1772 matematik a fyzik Joseph L. Lagrange). Webbův teleskop má průměr primárního zrcadla 6,5m pokryté pozlaceným beryliem a protože takto velké zrcadlo se do rakety Ariane 5 nevejde, skládá

se z 18 šestiúhelníkových zrcadel, a hmotnost má Webbův teleskop přibližně poloviční oproti Hubbleovu teleskopu. Aby mohl vesmírný dalekohled pozorovat slabé signály v infračerveném spektru bez toho, aby byl rušen jinými zdroji tepla, musí mít teleskop teplotu nižší než -223°C a proto je umístěn právě poblíž liberačního centra L2 soustavy Slunce - Země. Od hlavního zrcadla se poté fotony vesmírných objektů odrazí do sekundárního zrcadla a odtamtud to terciálního zrcadla a zrcadla pro jemné navádění, které umízní zaměřit se na konkrétní objekt. Pak už se světlo odrazí do jednoho ze čtyř vědeckých přístrojů, podobně jako tomu je u Hubbleova teleskopu. Webbův teleskop se zaměřuje na blízké infračervené záření, ale dokáže pozorovat i oranžové nebo červené viditelné světlo a střední infračervenou oblast. Dokáže detekovat objekty až 100krát slabší než Hubbleův teleskop a mnohem starší v historii vesmíru, až do červeného posuvu $z \approx 20$, což je asi 180 milionů let kosmického času po velkém třesku. Pozorovat může také blízké objekty, včetně objektů v naší sluneční soustavě, se zdánlivou úhlovou rychlostí 0,030 úhlové sekundy za sekundu nebo méně.



Obrázek 1.4: Teleskop Jamese Webba

Kapitola 2

Zkoumané prstencové galaxie

Prstencové galaxie, také označované jako R galaxie (ring galaxy), jsou bezesporu jedinečné, tento typ galaxií se vidí velmi zřídka. V Arpově katalogu je jich katalogizovaných jen 5 a astronomové odhadují, že mají ve vesmíru zastoupení asi jen 0,1%. Kupříkladu k porovnání, spirální galaxie (ke kterým se dle Hubbleovy klasifikace řadí i galaxie Mléčná dráha) tvoří přibližně tři čtvrtiny viditelných galaxií.

Prstencové galaxie mají několik charakteristických vlastností. Vyznačují se tvarem prstence bez náznaku jádrové oblasti a nebo s malým, ale od zbytku galaxie (prstence) izolovaným jádrem. Prstence jsou často složeny z bezpočtu mladých hvězd, které vznikly v důsledku kolize galaxií. Galaxie také mohou obsahovat prachové mračno, nebo plynné objekty uvnitř svého prstencového tvaru.

Pozorované prstencové galaxie jsou pravděpodobně nestabilními útvary a jejich odhadovaná životnost nepřesahuje 100 milionů let. Často jsou tyto galaxie výsledkem již už zmíněné interakce s jinými galaxiemi, nebo průchodem proudy hvězd kolem centrální části galaxie.

Jak tyto útvary vznikají, není úplně jasné a existuje mnoho teorií. Podle jedné z nejvíce protěžovaných teorií vzniká prstencová galaxie jako důsledek galaktické kolize, tedy po průniku galaxie kosmickým vetřelcem - jinou galaxií. Když dvě galaxie kolidují, vznikne rázová vlna, která se šíří od centra galaxie k její periferii a odvrhne všechny galaktický materiál do periferních oblastí. Zároveň s tím nastartuje velice bouřlivou hvězdotvorbu a dojde k vytvoření prstencové struktury. Další teorie naznačuje, že prstencové galaxie mohou vznikat díky výbuchu supernovy v jádru galaxie, čímž se vytvoří tlaková vlna, které vyvolá vznik prstencové struktury. Další, třetí možností je teorie, že galaxie byla původně spirální galaxií s příčkou, ale daná příčka se zhroutila. Spirální galaxie s příčkou jsou podobné normálním spirálním galaxiím, narozdíl od těch normálních se ovšem u spirálních galaxií s příčkou nenapojují jejich spirální ramena k jádru přímo, ale přes již zmíněnou příčku, která se otáčí stejnoměrně s jádrem. Mezi tyto galaxie patří např. Mléčná dráha. Této teorii ale neodpovídá např. u Hoagova objektu tvar jádra, ani prstence.



Obrázek 2.1: Prstencová galaxie, Hoagův objekt



Obrázek 2.2: Spirální galaxie s příčkou, NGC 1365

Obrázek 2.3: Ukázky galaxií

2.1 Příklady prstencových galaxií

Všechny galaxie, které jsou v této podkapitole zmíněné, budu více rozebírat v samostatných kapitolách, nyní uvádím jen pár stručných informací ke každé z nich, aby měl čtenář už ze začátku stručný přehled.

Hoagův objekt, který má téměř dokonalý prstenec tvořený hvězdami a plynem, se nachází v souhvězdí Hada na severní obloze. Stáří této galaxie se odhaduje na přibližně 600 milionů let. Jeho vnitřní průměr je přibližně 75 000 světelných let, zatímco vnější průměr 120 000 světelných let. Odborníci odhadují, že galaxie má hmotnost přibližně 700 miliard sluncí. Tento zajímavý útvar je charakterizován téměř prázdným prostorem mezi červenavým hustším jádrem galaxie a modrým prstencem. Podle vědců se zde mohou nacházet hvězdokupy a hvězdy.

Druhá prstencová galaxie, kterou budu zkoumat, se skrývá pod názvem Mayallův objekt, neboli Arp 148 s průměrem asi 176 000 světelných let. Tato galaxie se nachází na severní obloze v souhvězdí Velké medvědice ve vzdálenosti asi 450 milionů až 500 milionů světelných let od Země.

Kolo s loukotěmi (také uváděné jako Kolo od vozu) v souhvězdí sochaře je další z řady prstencových galaxií, která vznikla pravděpodobně důsledkem obří kosmické kolize tří galaxií. Je vzdálena 400 mil světelných let od Země.

Velmi netypickou galaxií obklopenou dvojitým prstencem mladých hvězd, je Galaxie NGC 1291 ze souhvězdí Eridanus, kterou lze najít také pod označením NGC 1269. Nelze jednoznačně říci, v jaké vzdálenosti se nachází, neboť zdroje se různí, uvádí se rozpětí od 12 milionů světelných let po 33 milionů světelných let. Je možné ji pozorovat i menším hvězdářským dalekohledem, bohužel ne v našich zeměpisných šířkách, neboť ve střední Evropě vůbec nevychází nad obzor.

Dále uvádím prstencovou galaxii, kterou se sice nebudu v práci dále zabývat, ale přesto ji nemohu nezmínit, neboť je viditelná ze Země už v sedmicentimetrovém dalekohledu. Jedná se o Sombrero v souhvězdí Panny, která na první pohled na prstencovou galaxii nevypadá, a mohla by být i obyčejnou spirálovou galaxií. To, že se nejspíše skutečně jedná o prstencovou galaxii, se zjistilo až pomocí Spitzerova dalekohledu. Rovina disku je totiž příliš sklopená, než aby bylo možné v přesvětlené střední části rozpoznat ve viditelném světle hvězd podrobnější velkorozměrovou strukturu.

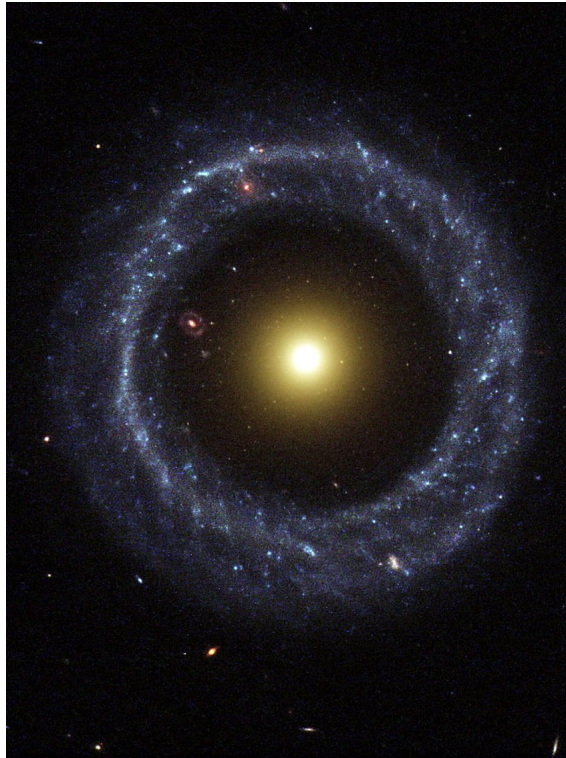
Pro zajímavost uvádím i některé spirální galaxie, například Arp 147 nacházející se v souhvězdí Velryby, vzdálených 440 milionů světelných let od Země, s průměrem asi 30 000 světelných let, zajímavostí je, že se jedná o vzájemně se ovlivňující soustavu dvou galaxií. A druhou spirální galaxií, kterou zde uvádím, je NGC 660 v souhvězdí Ryb, vzdálená 20 milionů světelných let od nás. Průměr je 50000 světelných let.

2.2 Hoagův objekt

Hoagův objekt, neboli NGC 6028 je jednou z nejdokonaleji kulatých prstencových galaxií. Jeho střední jádro je zářivé a výrazné, obklopené kruhovým prstenem tvořeným hvězdami. Tato struktura se nachází v souhvězdí Hada (Serpens) na severní obloze, poblíž souhvězdí Hadonoše. Toto souhvězdí je rozdělené na dvě části, na západě je první část, hlava Hada (Serpens Caput) a na východě je ocas Hada (Serpens Cauda). Mezi těmito dvěma částmi se nachází souhvězdí Hadonoše, za jehož součást bylo souhvězdí Hada dlouhou dobu vědci považováno. Tento závěr vyvrátil belgický astronom Eugène Joseph Delporte, který v roce 1930 určil hranice souhvězdí. Oddělil souhvězdí Hadonoše od souhvězdí Hada, a to dále rozdělil na již zmíněnou Hlavu a Ocas.

Nachází se zde mnoho zajímavých objektů, z hvězd například Unukalhai, nejjasnější hvězda souhvězdí, nachází se v blízkosti nebeského rovníku, takže je v určitých ročních obdobích částečně viditelná z obou polokoulí. Její zdánlivá jasnost je 2.6m a vzdálenost od Země 74 světelných let. Další zajímavostí je Orlí mlhovina (Messier 16, M16, nebo také NGC 6611), obsahující mladou otevřenou hvězdokupu (NGC 6611), která čítá přibližně 60 planet, a jejíž vzdálenost se odhaduje na 5 870 světelných let a emisní mlhovinu (IC 4703), v níž se nachází například Sloupy stvoření (Pillars of Creation), vyobrazené na obr.1. Jedná se o tři útvary z plynu a prachu, které vznikli díky hvězdným větrům obřích hvězd vanoucích z ústřední hvězdokupy. Jsou pojmenovány římskými číslicemi od severovýchodu jako Sloup I, Sloup II a Sloup III. vzdálené asi 7000 světelných let od Země, a patří mezi nejznámější objekty Messierova katalogu.

Galaxie Hoagův objekt byla pojmenována po svém objeviteli, americkém astronomovi Arthuru Hoagovi. Původně byl nejistý, zda jde o galaxii či planetární mlhovinu, a dokonce se domníval, že Hoagův objekt vznikl díky gravitační čočce. Avšak pozdější výzkumy ukázaly, že se jedná o prstencovou galaxii s jádrem a prstencem oddělenými přibližně 600 miliony světelných let.



Obrázek 2.4: Hoagův objekt

Prstenec Hoagova objektu má vnitřní průměr zhruba 75 tisíc světelných let a vnější průměr kolem 120 tisíc světelných let. Celková hmotnost této galaxie se odhaduje na 700 miliard Sluncí. Přestože je mezi jádrem a prstencem téměř prázdný prostor, mohou se zde nacházet hvězdokupy a hvězdy, avšak v takové vzdálenosti nejsou patrné.

Původ tohoto neobvyklého útvaru byl dlouhodobě zkoumán a existuje několik hypotéz, které se snaží osvětlit jeho vznik:

1. Gravitační čočkování: Myšlenka, že masivní objekt mezi námi a Hoagovým objektem zakřivuje světlo, což vytváří dojem kruhového prstence. Pozorování však tuto teorii vyvracejí, neboť prstenec a centrální jádro mají shodné červené posuny.
2. Srážka mezi galaxiemi: Další hypotéza zmiňuje srážku mezi galaxiemi jako možný způsob vzniku. Při čelním nárazu by jedna z galaxií vyčistila oblast kolem sebe a vytvořila by prstenec. Avšak rychlostní rozdíly nesouzní s očekávanými důsledky takové srážky.
3. Hlavní akrece: Třetí hypotézou je, že vznikl srážkou nebo těsným průletem mezi dvěma galaxiemi, přičemž hmotnost byla přenesena z jedné galaxie na druhou. Tato teorie se dobře shoduje s pozorováními hvězdné populace a dynamikou plynu.
4. Studená akrece: Další možná hypotéza naznačuje, že centrální jádro vzniklo zhroutením oblaku plynu (HI) a následně kontinuální akrecí plynu vytvářejí-

cího prsteneč. Resonance v této oblasti způsobují zhutňování plynu a vznik hvězd v mezích mezi jádrem a prstencem.

5. Nestabilita tyče: Poslední hypotéza zmiňuje nestabilitu tyče v disku galaxie, kde resonance mohou vést ke vzniku prstence. Avšak pozorovací důkazy a dynamika tuto teorii zpochybňují.

2.3 Kolo od vozu

Kolo od vozu je čočková galaxie v souhvězdí Sochaře, objevena roku 1941, známá také jako Zwickeyho elipsa, pojmenovaná takto po svém objeviteli, jímž byl Fritz Zwickey. Galaxie je vzdálena od Země 496 milionů světelných let a její průměr je 150 000 světelných let, je tedy o třetinu větší než Mléčná dráha (jejíž průměr je cca 100 000 světelných let).



Obrázek 2.5: Galaxie Kolo od vozu

Je odhadováno, že v minulosti bylo Kolo od vozu normální spirální galaxií, kdy přibližně před 200 miliony světelnými roky (než k nám světlo dorazilo, reálná doba je před 700 miliony lety) vznikla kolize s menší galaxií. Když menší společník prošel větší galaxií, téměř čelní srážka vytvořila obrovskou rázovou vlnu skrz galaxii. Rázová vlna se pohybovala vysokou rychlostí, zhruba 200 000 mil za hodinu, zameřovala prach a plyn a spustila aktivitu tvorby hvězd kolem centrální oblasti galaxie. Samotné centrum galaxie nebylo ovlivněno, zatímco prsteneč kolem jasného jádra je oblastí "starburst". Spirální struktura galaxie se nyní začíná znovu objevovat a mezi jádrem galaxie a vnějším prstencem se objevují slabá ramena nebo paprsky. V tomto prstenci přitom došlo a stále dochází k intenzivní tvorbě nových hvězd.

Vetřelecká galaxie, která prošla větším Vozovým kolem, je jednou z menších galaxií, které lze na některých snímcích vidět v blízkosti Vozového kola. Je to pravděpodobně galaxie, která se zdá být narušena a vykazuje důkazy o nové hvězdotvorné činnosti a mladých modrých hvězdách. Mohl by to však být druhý společník, který nemá žádný plyn, protože mohl být během střetnutí zbaven plynu. Existuje alternativní teorie, Ball - of - Light Particle Model, která může vysvětlit neobvyklý vzhled galaxie. Model naznačuje, že velká koule světla, která původně tvořila jádro galaxie, se nakonec stala nestabilní a rozdělila se na dvě nebo tři. Přinejmenším jedna z těchto vyloučených světelných koulí se stala jednou z menších galaxií, které lze vidět vedle Vozového kola. To by vysvětlovalo hmotný most, stopu neutrálního vodíkového plynu, spojující Kolo od vozu a jednu z menších galaxií v okolí. To, co zbylo z jádra, bylo vysoce nestabilní a kolem něj se točilo velké elektromagnetické pole, indukovalo masivní hvězdy a vyvrhovalo je ve tvaru prstenců vysokou rychlostí. Vysoká rychlost udržovala vyvržené hvězdy stabilní, protože v jejich jádrech vyvolávala velké gravitační síly. Povrch jádra Kola od vozu se nakonec začal stávat stabilnější a nadále vytlačoval hvězdy, které se staly „paprsky“ viděnými v galaxii.

2.4 NGC 7217

NGC 7217 je nezakázaná spirální galaxie v souhvězdí Pegase. Je to systém s nízkým obsahem plynu, jehož hlavními rysy jsou přítomnost několika kruhů hvězd soustředěných kolem jeho jádra: tři hlavní - nejvzdálenější z nich je nejvýraznější a ten, který obsahuje nejvíce plynu a tvorby hvězd v této galaxii - plus několik dalších uvnitř nejnvnitřnějšího, které byly objeveny s pomocí Hubbleova vesmírného dalekohledu.

Tato galaxie má také velmi velký a masivní sféroid, který se rozšiřuje za jeho disk. Dalšími pozoruhodnými rysy této galaxie jsou přítomnost řady hvězd rotujících v opačném směru kolem středu galaxie než většina z nich a dvě odlišné stelární populace: jedna středního věku ve svých nejnvnitřnějších oblastech a mladší, chudá na kovy ve svých nejvzdálenějších oblastech.

Bylo navrženo, že tyto rysy byly způsobeny sloučením s jinou galaxií a ve skutečnosti počítačové simulace ukazují, že NGC 7217 mohla být velká lenticulární galaxie, která se sloučila s jedním nebo dvěma menšími bohatými na plyn pozdního Hubbleova typu a stala se spirální galaxií, kterou dnes vidíme. Nicméně právě teď je tato galaxie izolovaná v prostoru, bez blízkých hlavních společníků.

V poslední době byl představen poněkud odlišný scénář, ve kterém by masivní bulva a halo NGC 7217 byly vytvořeny při sloučení a disk by se později formoval (a stále roste) buď akrecí plynu z mezihalaktického média nebo menších bohatých na plyn galaxií nebo nejspíše z dřívější rezervy.

NGC 1291, známá také jako NGC 1269, je prstencová galaxie s neobvyklým tvarem vnitřního pruhu a vnějšího prstence, která se nachází ve vzdálenosti přibližně 33 milionů světelných let v souhvězdí Eridana. Objevil ji James Dunlop v roce 1826 a později ji Johann Ludvig Emil Dreyer zařadil do Nového generálního katalogu jako NGC 1291. John Herschel nezávisle pozoroval stejný objekt v roce 1836 a zařadil jej



Obrázek 2.6: Galaxie NGC 7217

do katalogu jako NGC 1269, aniž by si uvědomil duplicitu. Tato galaxie byla v roce 2007 týmem NASA Galaxy Evolution Explorer označena jako příklad "přechodné galaxie".

NGC 1291 má radiální rychlost 0,83710 km/s, což naznačuje její pohyb směrem ke Slunci nebo od něj. Její úhlovou velikost, udávanou v obloukových minutách, lze použít k odhadu její velikosti v porovnání s její vzdáleností od Země. S hlavní osou 10,47 a vedlejší osou 8,13 spolu s orientačním úhlem 156 stupňů poskytuje přibližnou představu o její velikosti. Indikátor kvality "D" označuje spolehlivost měření.

2.5 NGC 1269

Vzdálenost NGC 1291 od Země je přibližně -1,00 světelného roku, i když se jedná o odhad založený na výpočtech a pozorováních. Doba cesty k NGC 1291 závisí na rychlosti pohybu, přičemž výpočty berou v úvahu jako referenční dobu necelý rok (365 dní).



Obrázek 2.7: Galaxie NGC 1269

Kapitola 3

Návrh

3.1 Výběr prostředí

Pro svou práci jsem si zvolila programové prostředí a programovací jazyk MATLAB. Hlavní vlastnosti MATLABu zahrnují schopnost pracovat s maticemi, vytvářet 2D a 3D grafy funkcí, implementovat algoritmy, provádět počítačovou simulaci, analyzovat a prezentovat data a také vytvářet aplikace s uživatelským rozhraním a toto jsou funkce, které já ve své práci potřebuji, a tedy jsem se rozhodla právě pro něj.

Mimo MATLABu existuje ovšem také spousta dalších programů, které mohou nabídnout podobné funkce. Níže jsou uvedené některé z nich.

1. Python s knihovnami NumPy a SciPy: Python je univerzální programovací jazyk, který s knihovnami NumPy a SciPy, může směle MATLABu konkurovat.
1. R: R je programovací jazyk a prostředí určené především pro statistickou analýzu a vizualizaci dat. Je populární mezi statistiky a výzkumníky v oblasti datové analýzy.
2. Julia: Julia je relativně nový programovací jazyk uvedený v roce 2012. Julia obzvláště vyniká v oblasti paralelního a distribuovaného výpočtu.
3. GNU Octave: GNU Octave je volně dostupný program, navržen jako open-source alternativa k MATLABu. Poskytuje podobnou syntaxi a funkce jako MATLAB, což umožňuje uživatelům snadnou přechodnost mezi oběma programy. I když nemá stejnou škálu funkcí jako MATLAB, GNU Octave je vhodnou volbou pro ty, kteří hledají zdarma dostupnou možnost pro vědeckotechnické výpočty.

MATLAB, také nazývaný matrix laboratory, je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk čtvrté generace. Je vyvíjen společností MathWorks a nejnovější verze s označením R2023a byla vydána v březnu 2023, verze R2023b je plánovaná na září (obvykle vydávají dvě verze ročně s označením např. R2023a a R2023b). MATLAB je dostupný pro různé operační systémy, včetně Linuxu (32bit, 64bit), Windows (32bit, 64bit) a Mac OS X (64bit).

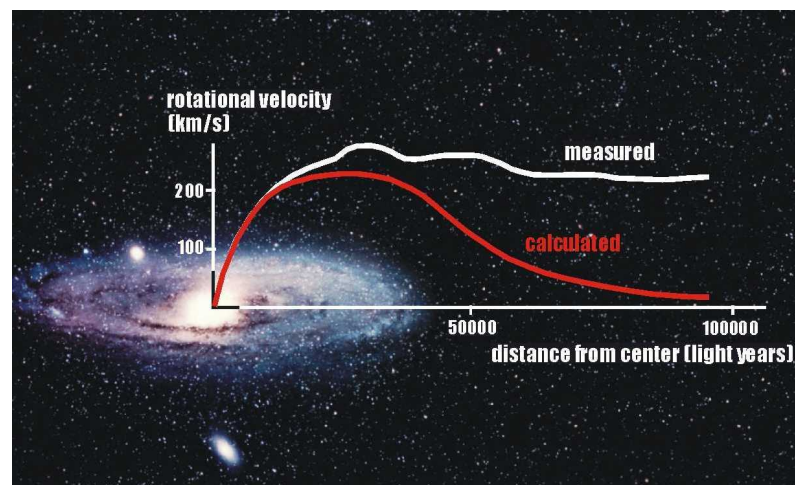
3.1.1 MATLAB

Programovací jazyk MATLAB vychází z jazyka Fortran. Původně MATLAB vznikl jako interaktivní nadstavba pro usnadnění práce s knihovnamí LINPACK a EISPACK pro práci s maticemi. Základním typem byly matice, které na rozdíl od většiny jiných systémů a jazyků nevyžadovaly nastavování dimenzí. Název MATLAB je zkratkou slov MATrix LABoratory, ve volném překladu lze přeložit jako „maticová laboratoř“.

Asi nejdůležitější částí MATLABu jsou knihovny funkcí, které jsou nazývány toolboxy. Systém jich nabízí více než 80. Toolboxy obsahují vždy uceleným způsobem včetně dokumentace a příkladů zpracovaný určitý obor. Příkladem může být toolbox sloužící pro numerickou matematiku, statistiku, a nebo pro digitální zpracování obrazu.

Původně byl MATLAB navržen pro matematické účely. Postupem času byly přidány další funkce a rozšíření, které se dnes využívá v jiných oblastech. V roce 2004 měl MATLAB přes jeden milion uživatelů, které tvořili převážně vědeckotechničtí pracovníci, studenti a zaměstnanci vysokých škol. MATLAB je široce využíván pro vědecké a výzkumné účely jak v soukromém sektoru, tak i v akademickém prostředí. Hlavní oblastí využití zahrnují technické obory a ekonomii.

3.2 Souhrn výsledků dosavadních výzkumů



Obrázek 3.1: Rotační křivky Galaxie v Andromedě

Na obrázku (3.1) jsou skutečné rotační rychlosti vnějších hvězd vyznačeny bílou čarou, zatímco rychlosti, které by se daly očekávat na základě odhadované hmotnosti viditelné hmoty v galaxii, jsou vyznačeny červenou čarou. Z tohoto vědci předpokládají, že více než 80 % hmoty galaxie musí tvořit temná hmota.

V současné době se tyto rotační křivky pokládají galaxií klíčový důkaz existence temné hmoty, protože vnější hvězdy rotujících galaxií se často pohybují kolem galaktického disku tak rychle, že by měly odletět do mezigalaktického prostoru, pokud

v galaxii není přítomna další "neviditelná" hmota, která je gravitačně udržuje na jejich oběžných drahách.

Tato problematika je patrná, když se zamyslíme nad Keplerovým zákonem o pohybu planet v naší sluneční soustavě. Merkur obíhá kolem Slunce oběžnou rychlostí 48 kilometrů za sekundu, zatímco Neptun obíhá kolem Slunce oběžnou rychlostí 5 kilometrů za sekundu. Ve Sluneční soustavě je blízkost planety k podstatné hmotnosti Slunce funkcí její oběžné rychlosti. Pokud by se tedy hypoteticky nějakým způsobem snížila hmotnost Slunce, stávající oběžná rychlost Neptunu by ho posunula směrem ven z jeho současné dráhy, což by ho mohlo vymrštít do mezihvězdného prostoru, pokud by změna byla dostatečně výrazná. Fyzika galaxie Mléčné dráhy se samozřejmě od Sluneční soustavy liší, protože její hmota je rozložena rovnoměrněji po celém galaktickém disku a ne centrálně, jako je tomu ve Sluneční soustavě.

Nicméně pokud se předpokládá podobný vztah mezi kumulativní hmotností Mléčné dráhy a oběžnou rychlostí jejích vnějších hvězd, je patrné, že viditelné objekty uvnitř Mléčné dráhy mají pouze 10-20 % hmotnosti, která je potřebná k udržení oběžných rychlostí hvězd v jejím vnějším disku. Z toho vyplývá, že zbytek galaktické hmoty musí tvořit temná (neviditelná) hmota.

Toto je obecný názor na fungování galaxií a klíčová součást současného standardního modelu kosmologie vesmíru. Existují ovšem teorie, které se tento obecný názor snaží vyvracet. Například italský vědec Jacopo F. L. Battaglia v článku s názvem "Possible External Origin of the Tully–Fisher Relation" v časopise *The Astrophysical Journal Letters* v roce 2020 přišel s teorií, že rotační křivky spirálních galaxií by mohly být vysvětleny gravitačním vlivem vzdálené hmoty, aniž by bylo nutné se na temnou hmotu vůbec odvolávat. Teorie se dále nijak nerozvíjela, nicméně chci ji uvést jako příklad, že se stále hledají cesty, jak tuto existenci temné hmoty potvrdit, nebo vyvrátit. V mé práci právě toto téma také řeším, a zkoumám, zda je možné, že by temná hmota v problematice orbitálních rychlostí v prstencových galaxiích vůbec nefigurovala.

Kapitola 4

Implementace

Tato podkapitola se věnuje samotné programovací části mé bakalářské práce. Můj kód převede vybraný obrázek galaxie do černobílého spektra, kde zkoumá vlastnosti jako jsou těžiště a orbitální rychlosti, a zobrazuje je ve čtyřech grafech, které budou vyobrazené níže, zvláště ke každé galaxii. Kód pro zpracování galaxií je popsán velice obecně a funguje pro všechny mnou zkoumané galaxie stejně, a proto nebudu ke každé galaxii psát zvláště žádné matematické vzorce a postupy, neboť by se vše opakovalo. Uvedu to pro přehlednější zobrazení v následující oddělené podkapitole.

4.1 Postup řešení a výpočty

Obrázek je nejprve načten a poté rozdělen na tři barevné kanály (r, g, b), které jsou převedeny na typ "double". Dále je vypočítán vážený průměr barevných kanálů a vytvořen černobílý obrázek "bw". Následují výpočty (4.1) a (4.2) souřadnic těžiště (x_r, y_r) černobílého obrázku "bw", koordináty těžiště (x_r, y_r) jsou vypsány na standardní výstup, tedy na obrazovku.

$$x_r = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{x_i \cdot i}{M} \quad (4.1)$$

$$y_r = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{y_j \cdot j}{M} \quad (4.2)$$

Pro obraz s počtem řádků nr a počtem sloupců nc (tedy pro matici "bw" typu $nr \times nc$) platí (4.1) a (4.2), kde M je celkový součet hodnot. První grafy na obrázcích (4.2) (??) (??) ukazují mapu rozložení hmot pro prstencové galaxie, přičemž je nastaveno vykreslení 20 vrstevnic obrázku. S ohledem na luminositu, pokud bych ji započítala do kódu:

$$bw = bw^{\frac{2}{7}} \quad (4.3)$$

zjistím, že při počítání s různými vztahy mezi luminositou a hmotností se výsledky neliší. Následně spočítám tangens 30° pomocí vzorce (4.4) a tangens 150° pomocí (4.5).

$$F_{30}(m) = F_{30}(m) + bw \frac{(x, y)}{\sqrt{(x - m)^2 + (y - (ya + m \cdot 0,577))^2 + 1}} \quad (4.4)$$

$$F_{150}(m) = F_{150}(m) + bw \frac{(x, y)}{\sqrt{(x - m)^2 + (y - y_{aa} + m \cdot 0,577)^2 + 1}} \quad (4.5)$$

Hodnota 0,577 je přibližnou hodnotou $\tan 30^\circ$ a číslo -0,577 je přibližnou hodnotou $\tan 150^\circ$.

V dalším kroku spočítáme průběh síly v absolutní hodnotě:

$$G(m) = |F(m + 1) - F(m)| \quad (4.6)$$

a orbitální rychlosti (které jsme zvětšili stokrát, aby byly v grafu dobře vidět) spočítáme podle vztahu:

$$v(m) = 100 \cdot \sqrt{|m - xr| \cdot G(m)} \quad (4.7)$$

Posledním krokem kódu je proložení dat polynomem stupně 10 pomocí funkcí MATLABu pro práci s polynomy `polyval` a `polyfit`, které pak ukazují v grafu.

Grafy vytvářím pomocí funkcí `plot` a `contour`.

Pro animaci orbitálních rychlostí na Hoagově objektu ještě na obrazovku vypisují hodnoty orbitálních rychlostí pro jednotlivé vzdálenosti, to je ovšem popsáno v podkapitole Animace (4.2.5).

4.2 Výstupy

S ohledem na fakt, že kód je psán obecně, a je tedy pro všechny prstencové galaxie stejný, je nadbytečné repetitivně uvádět podrobný popis kódu. Proto do následujících podkapitol uvedu pouze výstupy obecného kódu.

4.2.1 Hoagův objekt

Pro zkoumání Hoagova objektu jsem si vybrala obrázek (4.1), který je následně převeden na černobílé spektrum. Na obrázku (4.2) je vyobrazena mapa rozložení hmot, pro kterou je nastaveno vykreslení 20 vrstevnic obrázku.

Obrázek (4.3) vyobrazuje tangens 30° pomocí vzorce (4.4) a tangens 150° pomocí vzorce (4.5). Na obrázku (4.4) se vyobrazuje potenciál a průběh gravitační síly v



Obrázek 4.1: Zkoumaný obrázek Hoagova objektu

absolutní hodnotě (4.6). Graf zobrazuje závislost potenciálu a gravitační síly na vzdálenosti od středu galaxie. Graf (4.5) zobrazuje proložení vložených dat polynomem stupně 10.

4.2.2 Kolo od vozu

Pro zkoumání Kola od vozu objektu jsem si vybrala obrázek (4.6), který je následně převeden na černobílé spektrum.

Na obrázku (4.7) je vyobrazena mapa rozložení hmot, pro kterou je nastaveno vykreslení 20 vrstevnic obrázku.

Obrázek (4.8) vyobrazuje tangens 30° pomocí vzorce (4.4) a tangens 150° pomocí vzorce (4.5).

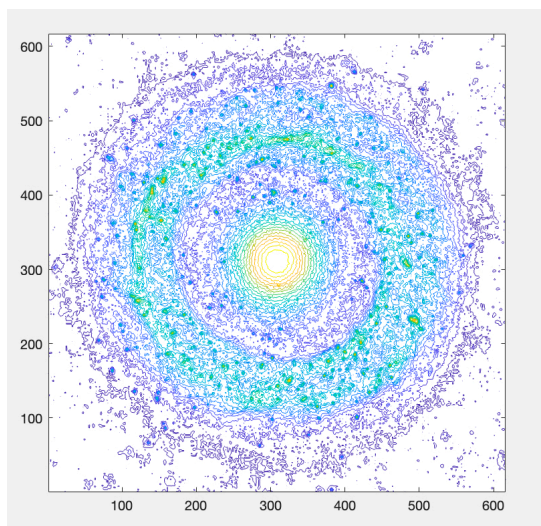
Na obrázku (4.9) se vyobrazuje potenciál a průběh gravitační síly v absolutní hodnotě (4.6). Graf zobrazuje závislost potenciálu a gravitační síly na vzdálenosti od středu galaxie. Graf (4.10) zobrazuje proložení vložených dat polynomem stupně 10.

4.2.3 NGC 7217

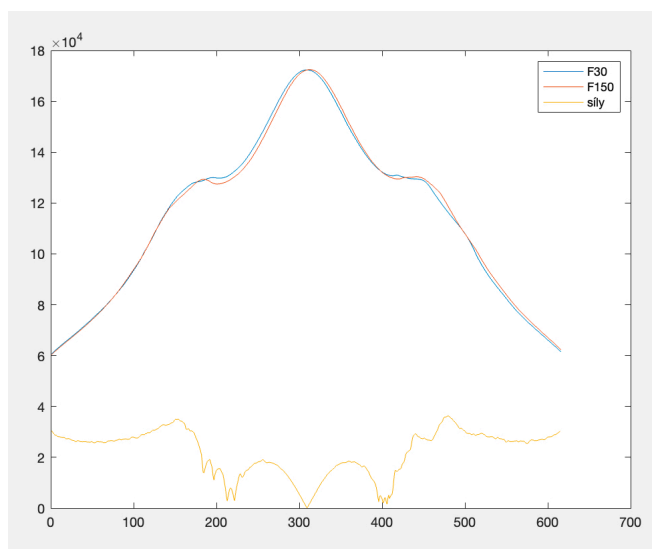
Pro zkoumání galaxie NGC 7217 jsem si vybrala obrázek (4.11), který je následně převeden na černobílé spektrum.

Na obrázku (4.12) je vyobrazena mapa rozložení hmot, pro kterou je nastaveno vykreslení 20 vrstevnic obrázku.

Obrázek (4.13) vyobrazuje tangens 30° pomocí vzorce (4.4) a tangens 150° pomocí vzorce (4.5).



Obrázek 4.2: Mapa rozložení hmot pro Hoagův objekt



Obrázek 4.3: Graf ukazující průběh síly, $\tan 30^\circ$ a $\tan 150^\circ$

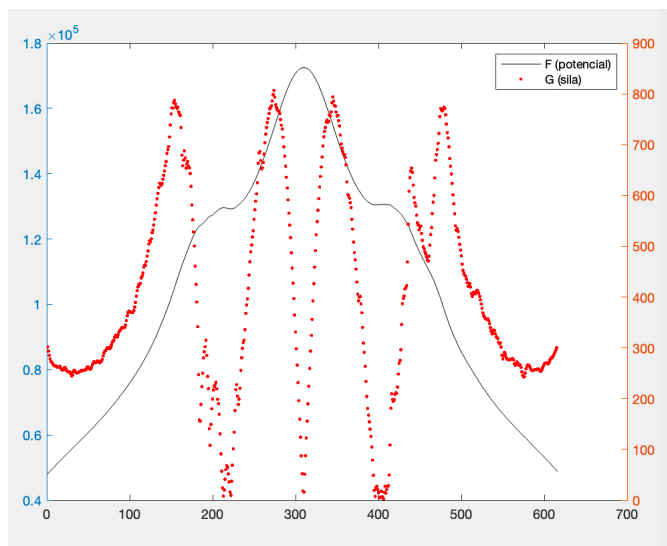
Na obrázku (4.14) se vyobrazuje potenciál a průběh gravitační síly v absolutní hodnotě (4.6). Graf zobrazuje závislost potenciálu a gravitační síly na vzdálenosti od středu galaxie. Graf (4.15) zobrazuje proložení vložených dat polynomem stupně 10.

4.2.4 NGC 1291

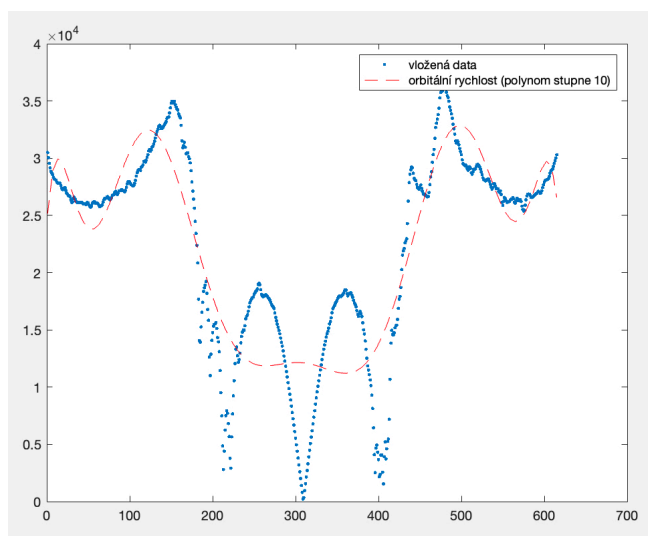
Pro zkoumání Kola od vozu objektu jsem si vybrala obrázek (4.16), který je následně převeden na černobílé spektrum.

Na obrázku (4.17) je vyobrazena mapa rozložení hmot, pro kterou je nastaveno vykreslení 20 vrstevnic obrázku.

Obrázek (4.18) vyobrazuje tangens 30° pomocí vzorce (4.4) a tangens 150° pomocí vzorce (4.5).



Obrázek 4.4: Graf vyobrazující potenciál a gravitační sílu

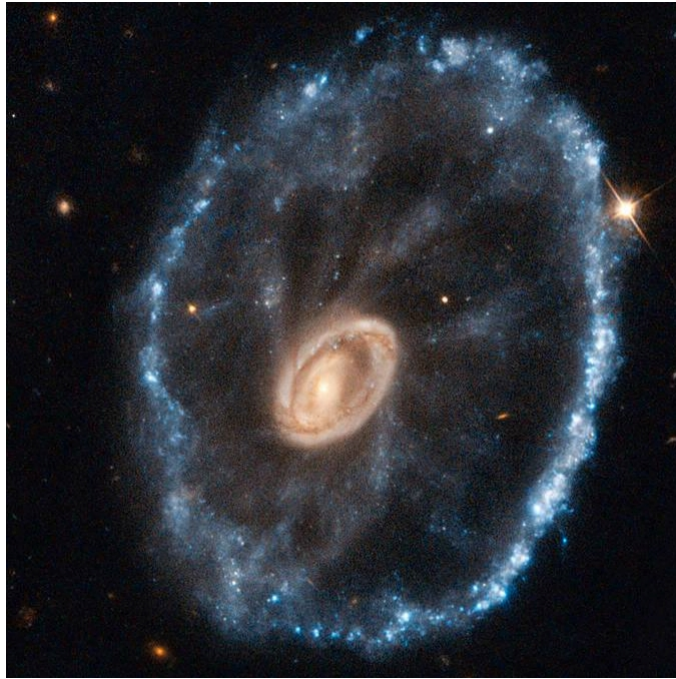


Obrázek 4.5: Graf vyobrazující vložená data proložená polynomem stupně 10

Na obrázku (4.19) se vyobrazuje potenciál a průběh gravitační síly v absolutní hodnotě (4.6). Graf zobrazuje závislost potenciálu a gravitační síly na vzdálenosti od středu galaxie. Graf (4.20) zobrazuje proložení vložených dat polynomem stupně 10.

4.2.5 Animace

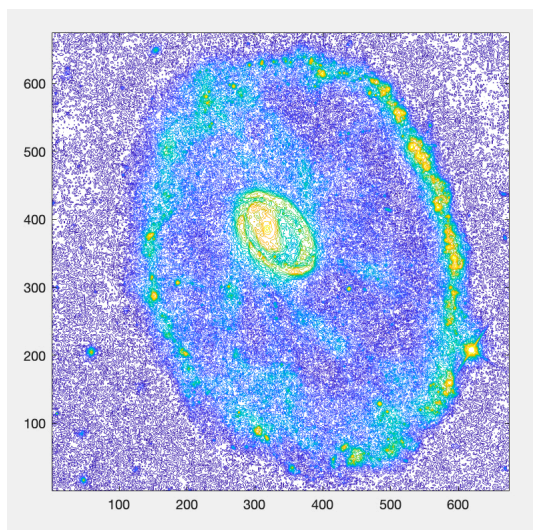
V rámci mé bakalářské práce jsem také vytvořila kód pro animaci orbitálních rychlostí v Hoagově objektu. Do kódu jsem nejprve načetla obrázek (zde Hoagův objekt (4.1)). Poté definuji souřadnice středu obrázku pomocí příkazu `center` podle hmotného středu soustavy, které jsem spočítala pro výpočet orbitálních rychlostí. Určím si pauzu před dalším otočením příkazem `frame_delay` (u mě 0, aby otáčení bylo plynulé). Dále musím určit data pro každý prstýnek, který bude animován. Zapi-



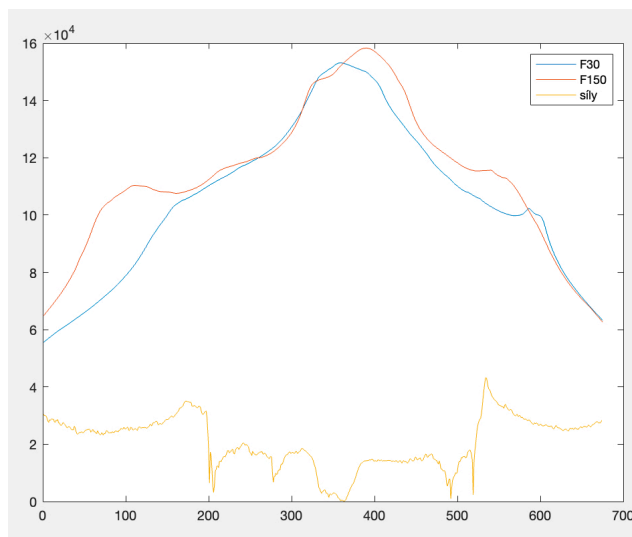
Obrázek 4.6: Zkoumaný obrázek Kola od vozu

suje se poloměr bližšího konce prstýnku a poloměr vzdálenějšího konce prstýnku a rychlost rotace každého z nich (ve stupních na jeden frame). Poté vložím do $[n]$ počet prstýnků, které jsem vytvořila, a vytvořím prázdné pole buněk pro jejich uložení. Vytvořím bitovou masku pro každý prstýnek, abych jej oddělila a odstranila z původního obrázku. Pomocí cyklu nakreslím vnitřní a vnější kružnice prstýnku a vytvořím z nich bitové masky, které zkombinuji tím, že od vnějšího kruhu odečtu vnitřní. Původní obrázek galaxie poté vynásobím vytvořenou bitovou maskou, a získám tím výsledný prstýnek. Nakonec odstraním pomocí inverzní masky prstýnek z původního obrázku.

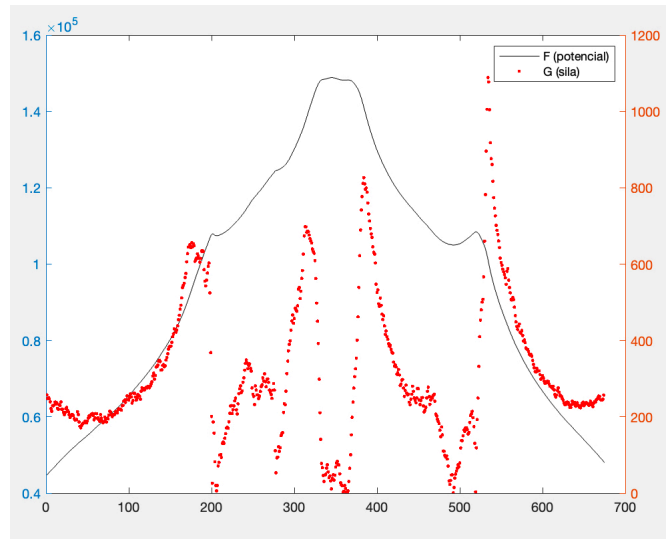
Nyní, pomocí dalšího cyklu, pro každý frame animace vytvořím překryvný obrázek toho původního obrázku a všech prstýnků otočených o příslušný úhel. Zavedu seznam obrázků s původním obrázkem a vytvořím vnořený for cyklus, aby se každý prstýnek otočil o příslušný úhel a přidal se do seznamu obrázků, poté vytvořím konečný frame. Tím ukončím for cyklus a definuji funkci pro překrytí více framů, inicializuji prázdný obrázek, který bude mít stejnou velikost, jako ten původní, a posledním, čtvrtým for cyklem, každý snímek přidám k překrytému snímku a ukončím for cyklus.



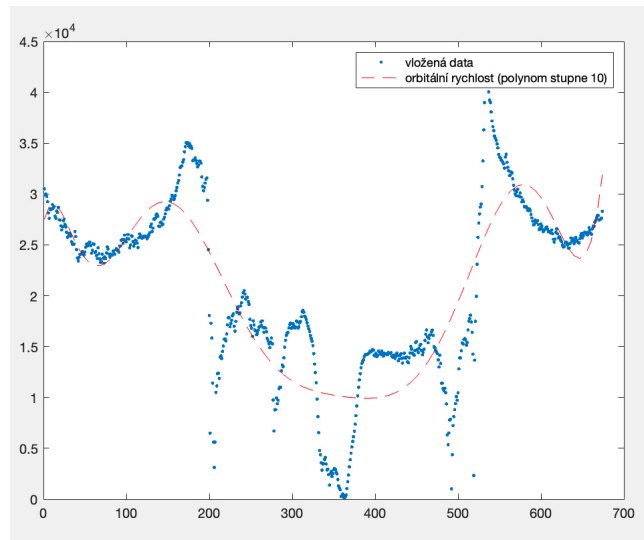
Obrázek 4.7: Mapa rozložení hmot pro Kolo od vozu



Obrázek 4.8: Graf ukazující průběh síly, $\tan 30^\circ$ a $\tan 150^\circ$



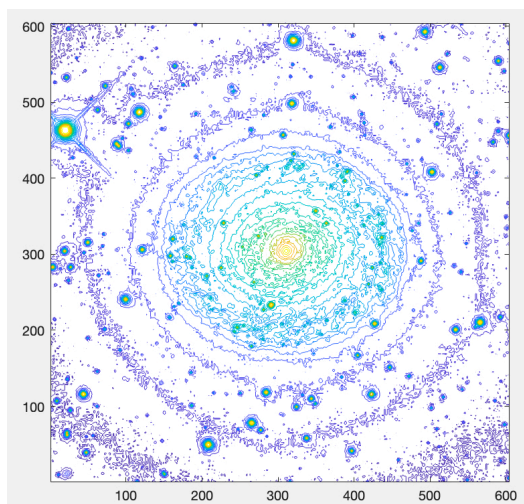
Obrázek 4.9: Graf vyobrazující potenciál a gravitační sílu



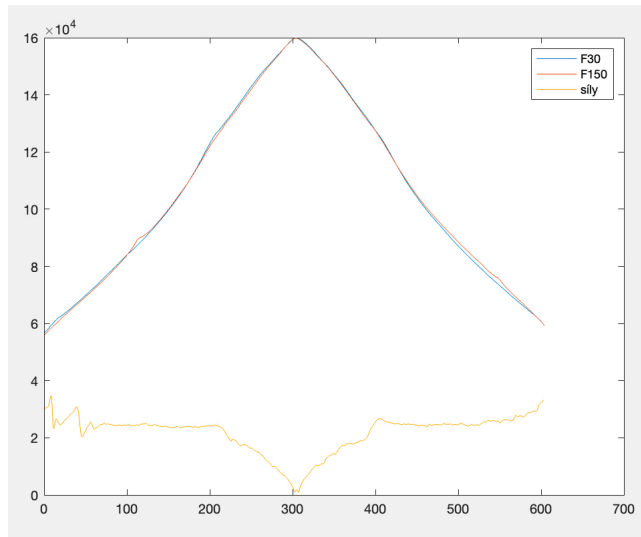
Obrázek 4.10: Graf vyobrazující vložená data proložená polynomem stupně 10



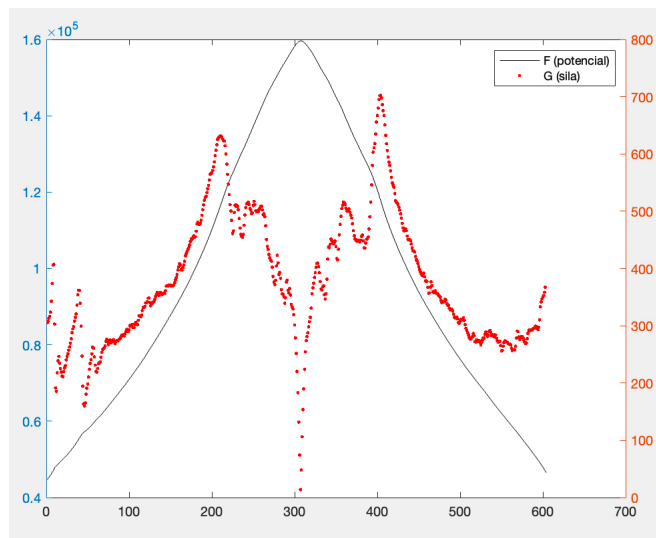
Obrázek 4.11: Zkoumaný obrázek galaxie NGC 7217



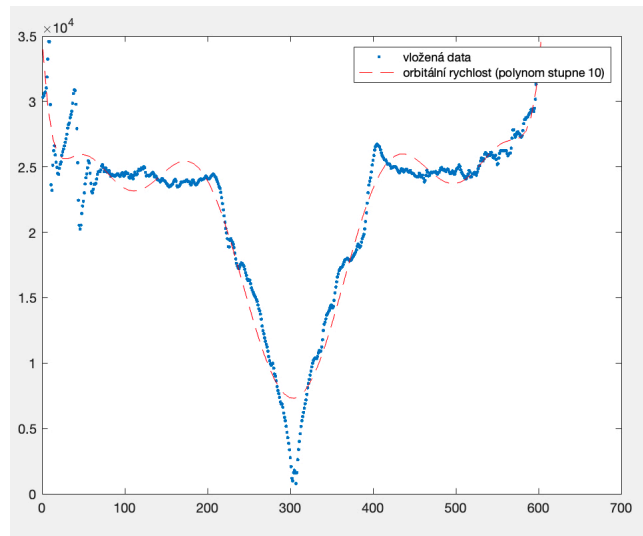
Obrázek 4.12: Mapa rozložení hmot pro galaxii NGC 7217



Obrázek 4.13: Graf ukazující průběh síly, $\tan 30^\circ$ a $\tan 150^\circ$



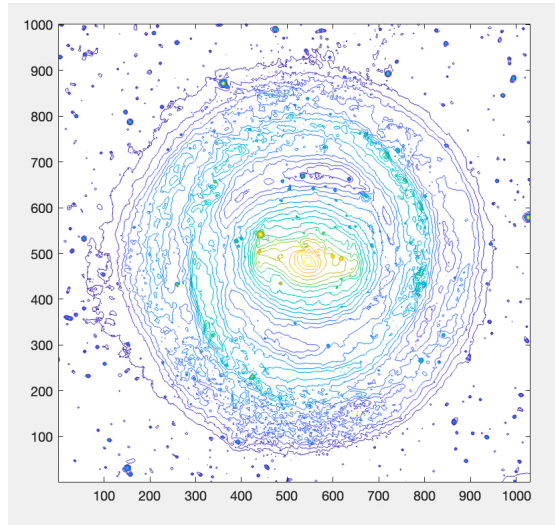
Obrázek 4.14: Graf vyobrazující potenciál a gravitační sílu



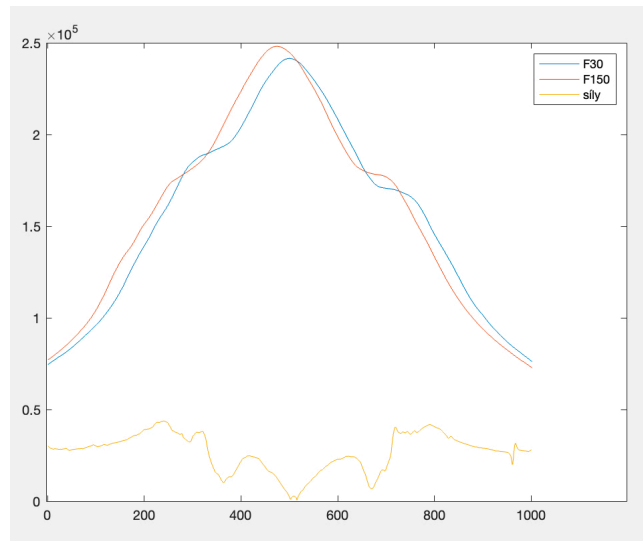
Obrázek 4.15: Graf vyobrazující vložená data proložená polynomem stupně 10



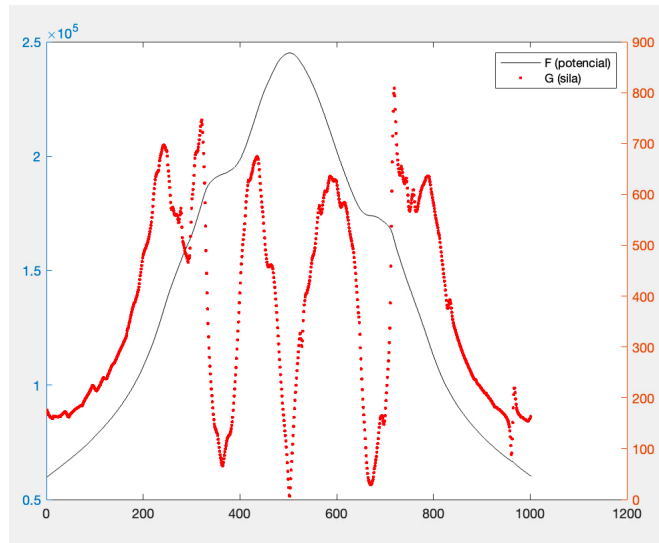
Obrázek 4.16: Zkoumaný obrázek galaxie NGC 1291



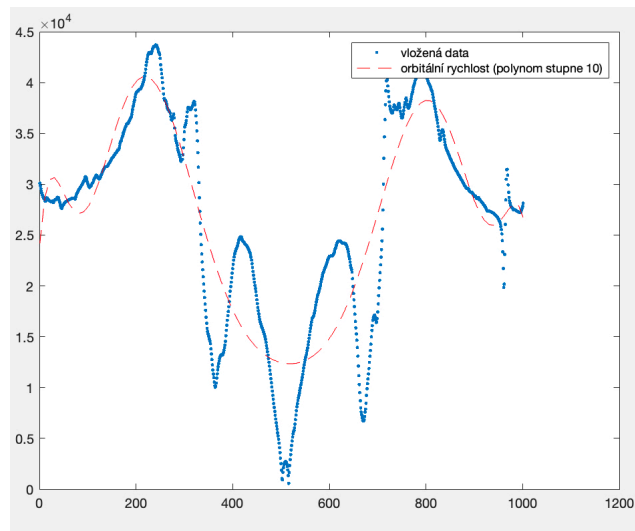
Obrázek 4.17: Mapa rozložení hmot pro galaxii NGC 1291



Obrázek 4.18: Graf ukazující průběh síly, $\tan 30^\circ$ a $\tan 150^\circ$



Obrázek 4.19: Graf vyobrazující potenciál a gravitační sílu



Obrázek 4.20: Graf vyobrazující vložena data proložená polynomem stupně 10

Závěr

V této bakalářské práci jsem se snažila splnit několik cílů. Prvním cílem bylo seznámit se s problematikou orbitálních rychlostí a prohloubit si znalosti o prstencových galaxiích a kosmonautice obecně.

Druhým cílem bylo vytvořit program, který bude zkoumat vliv vzdáleností na orbitální rychlosti, a podpoří tak teorii o neexistenci souvislosti mezi temnou hmotou a orbitálními rychlostmi v prstencových galaxiích.

Z výsledných grafů čtyř prstencových galaxií, které jsem vygenerovala, vyplývá, že vliv temné hmoty na orbitální rychlosti v prstencových galaxiích je buď zanedbatelný, nebo nulový.

Na závěr je důležité zdůraznit, že tato práce zahrnuje pouze minimální procento této problematiky a je zde více možností pro další výzkum. Mé poznatky mohou posloužit k rozšíření pochopení orbitálních rychlostí a jejich aplikace v kosmologii a astronomii.

Literatura

- [1] HANSON, Mark. *NGC 1291-1269* [online]. 2022 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.hansonastronomy.com/ngc-1291>
- [2] *About: NGC 1291* [online]. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://dbpedia.org/page/NGC_1291
- [3] KATKOV, Ivan, Ido FINKELMAN, Alexei MOISEEV a Noah BROSCHE. *Hoag-s Object: Evidence for Cold Accretion onto an Elliptical Galaxy*. Dostupné také z: <https://arxiv.org/pdf/1108.3079.pdf>
- [4] DOE, John. *Hoag-s Object* [online]. 2022 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.constellation-guide.com/hoags-object/>
- [5] *Zářivý výkon* [online]. USA: Wikimedia Foundation, 2005 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zářivý_výkon
- [6] *STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0204.htm>
- [7] KRTIČKA, Jiří a Zdeněk MIKULÁŠEK. *Základy fyziky hvězd*. 2005. Dostupné také z: <https://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F3080.pdf>
- [8] *Newtonův gravitační zákon* [online]. 2022 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Newton%C5%AFv_gravita%C4%8Dn%C3%AD_z%C3%A1kon
- [9] *Vesmírný dalekohled Jamese Webba* [online]. USA: Wikimedia Foundation, 2005 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vesm%C3%ADrn%C3%BD_dalekohled_Jamese_Webba
- [10] KUBALA, Petr. *Webbův teleskop: Skládačka za 250 miliard startuje do vesmíru* [online]. ABC, 2021 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.abicko.cz/clanek/precti-si-technika-vesmir/28349/webbu-veleskop-skladacka-za-250-miliard-startuje-do-vesmiru.html>
- [11] [online]. USA: Wikimedia Foundation, 2005 [cit. 2023-08-02]. Librační centrum. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Libra%C4%8Dn%C3%AD_centrum

- [12] DUNBAR, Brian. *The Pillars of Creation* [online]. USA: National Aeronautics and Space Administration, 2018 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/image-feature/the-pillars-of-creation/>
- [13] GARNER, Rob. *Observatory - Instruments* [online]. USA: National Aeronautics and Space Administration, 2023 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/goddard/hubble-space-telescope-science-instruments>
- [14] *Edwin Hubble* [online]. USA: Wikimedia Foundation, 2005 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble
- [15] *Hubbleův vesmírný dalekohled* [online]. USA: Wikimedia Foundation, 2008 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hubbleův_vesm%C3%ADrn%C3%AD_dalekohled
- [16] *STS-125* [online]. USA: Wikimedia Foundation, 2005 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/STS-125>
- [17] KULHÁNEK, Petr. *Hubbleův vesmírný dalekohled* [online]. Aldebaran Group, 2008 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_46_hst.php
- [18] NGC 7217. In: *Alchetron* [online]. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://alchetron.com/NGC-7217>
- [19] MILLER, Bernard. NGC 1269. In: *Telescope live* [online]. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://telescope.live/gallery/ngc-1269-2>
- [20] Webb Captures Stellar Gymnastics in The Cartwheel Galaxy. In: *NASA* [online]. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/webb-captures-stellar-gymnastics-in-the-cartwheel-galaxy>
- [21] NERLICH, Steve. Could dark matter not matter? *Phys.org*. 2011, **2011**. Dostupné také z: <https://phys.org/news/2011-12-dark.html>
- [22] BRANDOS, Otakar. *Kosmické rychlosti (1., 2., 3.), jak na výpočet rychlostí* [online]. 2016 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.treking.cz/astronomie/kosmicke-rychlosti.htm>
- [23] *Kosmická rychlost* [online]. USA: Wikimedia Foundation, 2005 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kosmická_rychlost
- [24] *Gravitační manévr* [online]. USA: Wikimedia Foundation, 2005 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Gravita%C4%8Dn%C3%AD_man%C3%A9vr