

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**NFW hustotní profil temné hmoty
a slupkové galaxie**

Václav Glos

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Bruno Jungwiert, Ph.D.

2015

Bibliografický záznam

Autor: Václav Glos
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: NFW hustotní profil temné hmoty a slupkové galaxie

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

Vedoucí práce: RNDr. Bruno Jungwiert, Ph.D.

Akademický rok: 2014/15

Počet stran: 50

Klíčová slova: slupkové galaxie, NFW hustotní profil, Plummerova sféra, eliptické galaxie, temná hmota

Bibliographic entry

Author: Vaclav Glos
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of thesis: NFW density profile and shell galaxies

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: RNDr. Bruno Jungwiert, Ph.D.

Academic Year: 2014/15

Number of Pages: 50

Keywords: shell galaxies, NFW density profile, Plummer sphere, elliptical galaxies, dark matter

Děkuji vedoucímu práce doktoru Bruno Jungwiertovi za věnování jeho volného času, přátelský a ochotný přístup a v neposlední řadě za výborný nápad na téma této bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne:

Václav Glos

.....

.....

Abstrakt:

Ve většině simulací slupkových galaxií bylo v minulosti užíváno Plummerova hustotního profilu. Z pohledu dnešní astrofyziky má však tento profil několik nedostatků včetně neuvažování takzvané temné hmoty. V této práci porovnááme výsledky simulace vzniku slupkových galaxií získané s Plummerovým hustotním profilem a kosmologicky motivovaným NFW hustotním profilem. Výsledky prokázaly rozdíl v rozložení částic jednotlivých slupek vzhledem k úhlu od osy srážky. Tento rozdíl by měl být pozorovatelný a měl by podpořit správnost jednoho z hustotních profilů.

Klíčové slova: slupkové galaxie, NFW hustotní profil, Plummerova sféra, eliptické galaxie, temná hmota.

Abstract:

Most simulations of the shell galaxies that were done in the past used Plummer's density profile. From a contemporary perspective it has, however, several shortcomings, including the fact that it doesn't consider dark matter. In this paper we compare the results from simulations of the formation of shell galaxies using both the Plummer density profile and the cosmologically motivated NFW density profile. The results demonstrated a difference in the particle distribution of each shell relative to their angle from the axis of collision. This difference should be observable and should support the accuracy of one of the density profiles.

Keywords: shell galaxies, NFW density profile, Plummer sphere, elliptical galaxies, dark matter.



MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2014/2015

Ústav: Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Student: Václav Glos

Program: Fyzika

Obor: Astrofyzika

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PŘF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

Téma práce: NFW hustotní profil temné hmoty a slupkové galaxie

Téma práce anglicky: NFW density profile and shell galaxies

Oficiální zadání:

Kosmologické simulace vzniku galaxií ukazují, že radiální průběh hustoty hala temné hmoty lze dobře popsat tzv. Navarro-Frenk-Whiteovým (NFW) profilem (Navarro, Frenk, White, 1995, 1996). Cílem práce je studovat vliv této hustotní závislosti, která má ve svém centru tzv. hrot (cusp), na tvar hvězdných slupek v tzv. slupkových galaxiích. Student využije existující numerický kód pro simulaci vzniku slupek a zamění v něm stávající gravitační potenciál, který má ve svém centru konstantní hustotní jádro, NFW profilem. Výsledky budou porovnány s literaturou, v níž se simulace slupkových galaxií zpravidla provádějí právě s konstantním hustotním jádrem, a nikoli kosmologicky motivovaným hrotem hustoty. Literatura: 1. Binney, J., Tremaine, S., Galactic dynamics, Princeton University Press, 2008 2. Ebrová, I., Shell galaxies, diplomová práce, MFF UK, 2007 3. odborné články dle pokynů školitele


Jazyk závěrečné práce: čeština

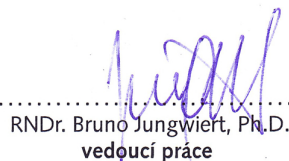
Vedoucí práce: RNDr. Bruno Jungwiert, Ph.D.

Datum zadání práce: 11. 11. 2014

V Brně dne: 10. 12. 2014

Souhlasím se zadáním (podpis, datum):


.....
Václav Glos
student


.....
RNDr. Bruno Jungwiert, Ph.D.
vedoucí práce


.....
prof. Rikard von Unge, Ph.D.
ředitel Ústavu teoretické fyziky a
astrofyziky

Obsah

Úvodní slovo autora	8
Motivace k tématu	9
1 Obecný úvod	10
1.1 Vznik galaxií	10
1.2 Druhy galaxií	12
1.2.1 Eliptické galaxie	12
1.2.2 Spirální galaxie	13
1.2.3 Nepravidelné galaxie	14
1.3 Slupkové galaxie	15
2 Zjednodušený fyzikální popis galaxií	17
2.1 Gravitační potenciály galaxií	17
2.1.1 Plummerův potenciál	19
2.1.2 NFW potenciál	21
3 Pohyb částice v potenciálu	23
3.1 Pohybové rovnice	23
3.2 Numerické řešení rovnic metodou Leap-frog	24
3.3 Rozbor pohybu částice v obou potenciálech	26
4 Simulace vzniku slupkových galaxií	30
4.1 Představení našeho modelu	30
4.2 Rozbor slupek v obou potenciálech	31
4.2.1 Vývoj poloměru slupek v čase	32
4.2.2 Vývoj úhlu rozevření slupek v čase	36
Závěr	41

Přílohy	42
Program pohybu částice v potenciálech	43
Program na vytvoření animace z výstupu I.	43
Původní program pro simulace vzniku slupkových galaxií	43
Upravený program pro simulace vzniku slupkových galaxií v Plummerově potenciálu	44
Upravený program pro simulace vzniku slupkových galaxií v NFW potenciálu	44
Program na vykreslení jednotlivého snímku slupky	45
Program na vytvoření animace slupek	45
Odkazy	46
Literatura	48
Elektronické zdroje	49

Úvodní slovo autora

V dnešní vědě najdeme mnoho nezodpovězených otázek. Některé jsou velmi obecné a některé naopak vystupují jen v úzkém okruhu jevů. Mě to vždycky táhlo spíše k přemýšlení nad těmi fundamentálními. I když nalezení odpovědí na fundamentální otázky je mnohdy velmi obtížné a s aktuálně dostupnými informacemi často nemožné, je zde jedna otázka, u které by odpověď mohla být blízko. A to otázka temné hmoty.

V této práci se rozhodně nehodlám pokoušet zodpovědět otázky temné hmoty, ale myslím, že studium galaktické dynamiky, konkrétně problematiky slupkových galaxií, je dobrým začátkem cesty, na které se o temné hmotě dá něco dozvědět.

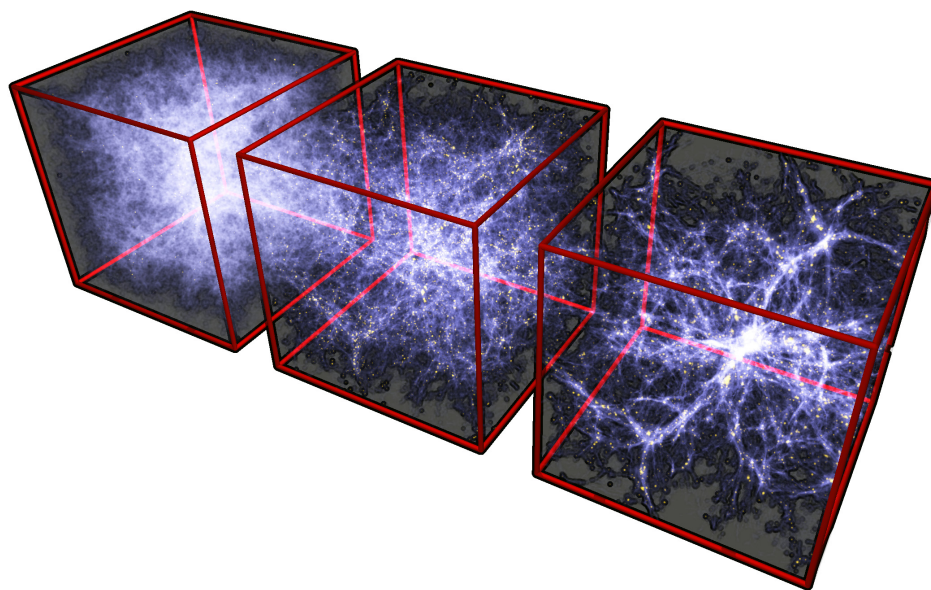
Cílem této práce je seznámit se se základy modelování galaktické dynamiky se vším, co k tomu náleží, a pokud možno vytvořit užitečný materiál pro kolegyně a kolegy se stejným či podobným cílem.

Motivace k tématu

Při simulacích dynamiky eliptických galaxií je nejčastěji používán Plummerův hustotní profil. Kosmologické modely vzniku galaxií však předpovídají NFW hustotní profil, jenž se od Plummerova podstatně liší.

Jak se kosmologicky motivovaný hustotní profil projeví na vlastnostech slupek? Najdeme rozdíly, které by mělo být možné pozorovat?

To je naše motivace k tématu NFW hustotní profil temné hmoty a slupkové galaxie.



Obrázek 1: Hydrodynamické simulace kosmologických struktur.
[Credit: Volker Springel and the Max Planck Institute for Astrophysics]

Upraveno z [1]

Kapitola 1

Obecný úvod

V této kapitole najdete doplnění k bakalářskému kurzu galaktické astronomie a zopakování základních poznatků. Informace byly čerpány z [B] a [C].

1.1 Vznik galaxií

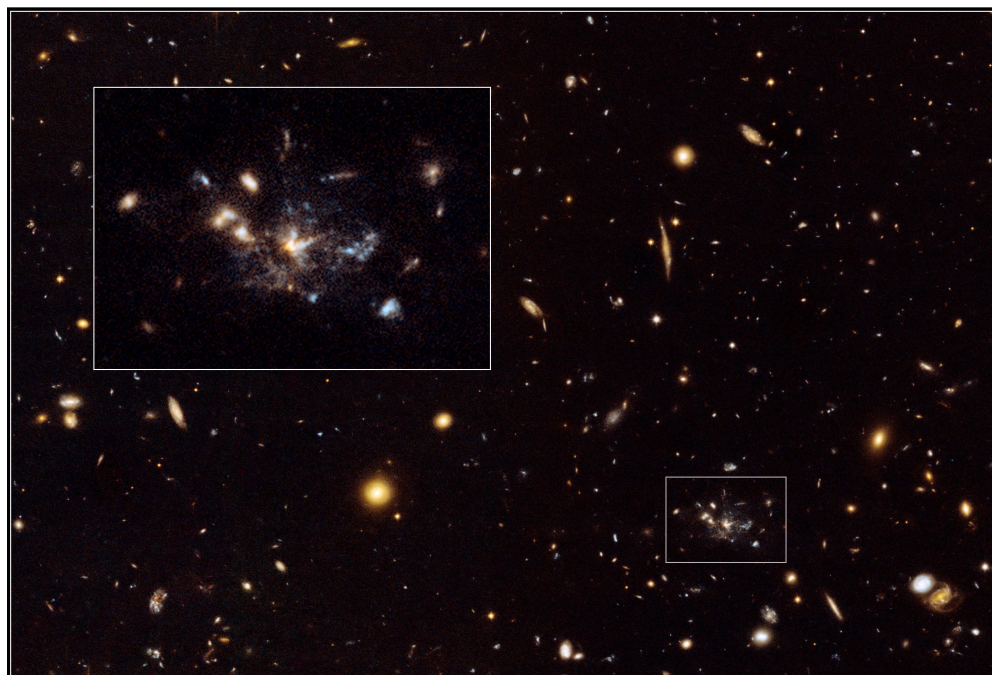
Podle současných kosmologických simulací se galaxie začaly formovat přibližně v době 700 milionů let po velkém třesku. Modely utváření galaxií jsou objektem probíhajícího výzkumu a můžeme je rozdělit na dvě skupiny podle předpokládaných počátečních podmínek.

První skupinou jsou modely označovány *top-down* neboli odshora dolů, u kterých se vznik galaxií simuluje z obřích plynných oblaků větších než výsledná galaxie. Gravitace zvítězí nad tlakem plynu a oblak se začne smršťovat. Touto skupinou modelů se dá dobře vysvětlit několik pozorovaných jevů. Pokud ale chceme vysvětlit častý výskyt galaxií v kupách tak, že galaxie v kupě vznikly z jednoho velkého oblaku plynu, vyvstane problém s předpovězenou dobou potřebnou k fragmentování a smrštění oblaku. Podle modelu by mělo docházet k takovému formování galaxií i v současnosti, což pozorování nepodporují.

Druhou skupinu tvoří modely *bottom-up*, česky odspoda nahoru. Tyto modely formují galaxie slučováním malých shluků hmoty o hmotnostech v řádech milionů Sluncí, které se mohly tvořit už ve velmi mladém vesmíru. Vzájemným gravitačním přitahováním shluků dochází k růstu na stále hmotnější objekty a vznikají galaxie, následně kupy a nadkupy galaxií. Výstupy této skupiny simulací správně předpovídají početní převahu malých galaxií a rovněž doba potřebná pro tvorbu kup a nadkup galaxií odpovídá současnému pozorování.

Obě skupiny modelů mají mnoho dalších charakteristik, z nichž některé jsou

v souladu s pozorováním a některé ne, ale pro vytvoření základní představy snad bude stačit zmíněné. Simulace nejlépe odpovídající pozorování budou pravděpodobně kombinovat oba zmíněné modely.



Obrázek 1.1: Radiová galaxie MRC 1138-262 - Spider web. Galaxie je ve vzdálenosti 10,6 miliard světelných let. Vidíme tedy slučování shluků hmoty (clumps) v době přibližně 3 miliardy let po velkém třesku.

[Credit: Hubble Space Telescope 2006, NASA, ESA, G. Miley and R. Overzier (Leiden Observatory), and the ACS Science Team]

Upraveno z [2].

1.2 Druhy galaxií

Už v úsvitu galaktické astronomie bylo zavedeno rozdělení galaxií na tři druhy: eliptické, spirální a nepravidelné. Tyto druhy byly zpočátku považovány za vývojová stádia galaxií, ale později se ukázalo, že napříč druhy jsou nejstarší hvězdy podobně staré, a to přibližně 13 miliard let. Rozdíl tedy není ve stáří, ale ve scénáři vzniku.

Podrobnější rozebrání možných scénářů vedoucích ke vzniku jednotlivých typů galaxií by bylo na samostatnou práci. Uvedu proto jen zobecněnou představu.

1.2.1 Eliptické galaxie

Je-li počáteční rotace zárodku galaxie dostatečně pomalá, dojde k utvoření většiny hvězd dříve než ke zploštění galaxie do plochého disku. K dalšímu zplošťování pak dochází jen málo, protože pravděpodobnost srážení hvězd mezi sebou je velmi malá. Vzniká tak eliptická galaxie.

Eliptické galaxie se dále vyznačují náhodnějšími hvězdnými orbitami a omezenou tvorbou hvězd způsobenou malým obsahem prachu a plynu. Převládají zde méně hmotné staré hvězdy, které ještě nestihly dojít do závěrečného stádia hvězdného vývoje.



Obrázek 1.2: V pravé části vidíme typickou eliptickou galaxii ESO 325-G004.
[Credit: NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA), Acknowledgment: J. Blakeslee (Washington State University)]

Upraveno z [3].

1.2.2 Spirální galaxie

Rychlejší rotace budoucí galaxie má za následek častější srážky plynných mračen a zploštění disku proběhne dříve, než stihne vzniknout většina hvězd. V plochem plynném disku se mají tendenci tvořit hustotní vlny. V hustějších oblastech dochází k četné tvorbě hvězd a tyto oblasti jsou oproti okolnímu disku svítivější. Zářivější struktury neboli ramena mají spirální tvar a jsou hlavním znakem spirálních galaxií.

Dalšími znaky spirálních galaxií jsou uspořádanější hvězdné orbity a bohatá tvorba hvězd díky dostatečnému množství prachu a plynu. Nacházíme zde velké množství mladých horkých hvězd, ale i starší hvězdy II. populace.



Obrázek 1.3: Spirální galaxie NGC 1309 z kupy galaxií v souhvězdí Eridianus.
[Credit: NASA, ESA, The Hubble Heritage Team, (STScI/AURA) and A. Riess (STScI)]

[4]

1.2.3 Nepravidelné galaxie

Mezi nepravidelné galaxie se řadí všechny ostatní. Jsou to většinou méně hmotnější galaxie s nesymetrickým rozložením hmoty. Aktivita tvorby hvězd i obsah prachu a plynu nejsou charakteristicky dané a mohou se výrazně lišit u jednotlivých galaxií. Stejně tak i scénář vzniku má mnoho variant.



Obrázek 1.4: Nepravidelná trpasličí galaxie NGC 4449.

[Credit: NASA, ESA, A. Aloisi (STScI/ESA), and The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration]

[5]

1.3 Slupkové galaxie

Z hierarchického vývoje galaxií je zřejmé, že o srážky mezi galaxiemi není nouze. Pozorování tomu odpovídá a následky srážek mohou být rozličné. Záleží přitom zejména na poměru hmotností galaxií a na trajektorii srážky.

Slupkové galaxie vznikají při těsné srážce těles s poměrem hmotnosti od desítek až do několika stovek. Označme si hmotnější galaxii jako primární a méně hmotnou jako sekundární. Při takové srážce se vlastnosti primární galaxie změní jen málo, zato materiál sekundární galaxie, jenž se začne pohybovat v silnějším gravitačním poli primární galaxie, už nadále nebude tvořit samostatný objekt. Dráhy jednotlivých těles budou záviset na jejich počáteční poloze a rychlosti. Ty se liší v rámci rozlohy sekundární galaxie a jejího rozdělení oběžných rychlostí. Část materiálu může začít obíhat v gravitačním poli primární galaxie a část může ze systému uniknout. Velikost vzájemné rychlosti galaxií je v porovnání s typickou oběžnou rychlostí v sekundární galaxii několiknásobně větší a tak budou dráhy podstatné části materiálu podobné. Díky podobnosti drah budou v čase pozorovatelné oblasti se zvýšenou plošnou hustotou materiálu sekundární galaxie. Pokud následek srážky budeme pozorovat z určitých úhlů, budou nám tato nahuštění materiálu sekundární galaxie vykreslovat tvary podobné *slupkám*.

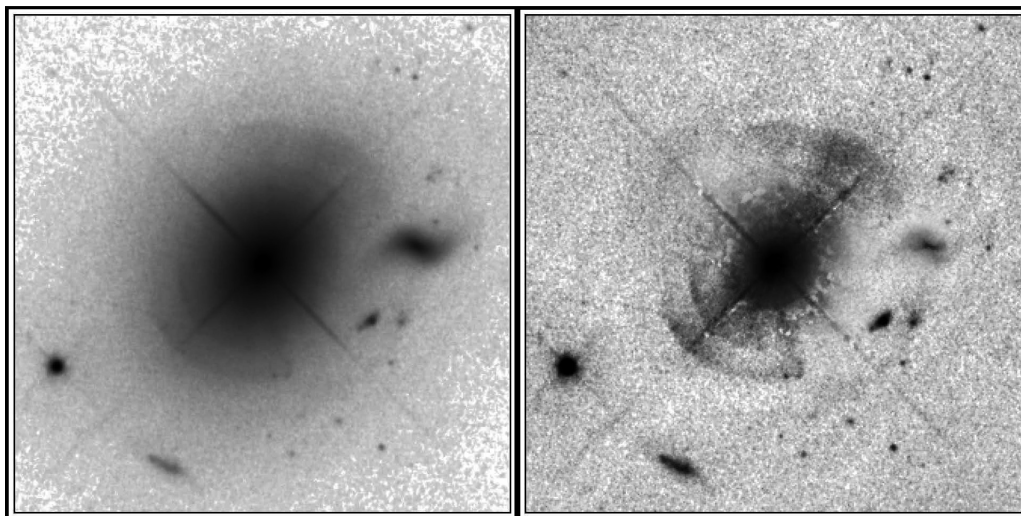


Obrázek 1.5: Slupky v eliptické galaxii NGC 7600.
[Credit: Ken Crawford (Rancho Del Sol Observatory)]
Upraveno z [6].

Je asi dobré upozornit, že slovo srážka tady má trochu jiný význam než obvykle. Rozestupy mezi hvězdami v galaxiích jsou natolik velké, že k fyzické srážce hvězd dojde jen s velmi malou pravděpodobností. Pozorované následky jsou způsobeny zejména vzájemným gravitačním působením.

Podobné slupky jsou nacházeny u téměř 10 % galaxií raného typu (Hubbelovy třídy E až S0) a u 1 % spirálních galaxií. Počet pozorovaných slupek se pohybuje od 1 do přibližně 30.

Ne vždy jsou slupky natolik jasné, že jdou vidět na první pohled jako v galaxii NGC 7600. Často je potřeba snímek vhodně zpracovat, abychom slupky zvýraznili. Můžeme například odečíst předpokládaný profil jasnosti primární galaxie, který by měl být úměrný jednoduché monotónní funkci.



Obrázek 1.6: Zpracování snímku kvasaru QSO MC2 1635+119.
[Credit: NASA, ESA, and G. Canalizo (University of California, Riverside)]
Upraveno z [7].

Kapitola 2

Zjednodušený fyzikální popis galaxií

Pokud chceme vytvořit fyzikální model simulující událost galaktické dynamiky tak, aby ho dnešní počítače spočítaly v rozumném čase, je potřeba udělat ve fyzikálním popisu situace několik zjednodušení. Vhodná míra zjednodušení je rozdílná pro různé typy událostí a pro požadované výstupní parametry.

V našem modelu zanedbáváme všechny interakce kromě gravitační, protože vliv ostatních je v případě srážek galaxií o několik řádů menší. Gravitační potenciál galaxie, který je ve skutečné galaxii tvořen působením veškeré hmoty galaxie, aproximujeme jednoduchou funkcí. Tato funkce bude hlavním parametrem simulace.

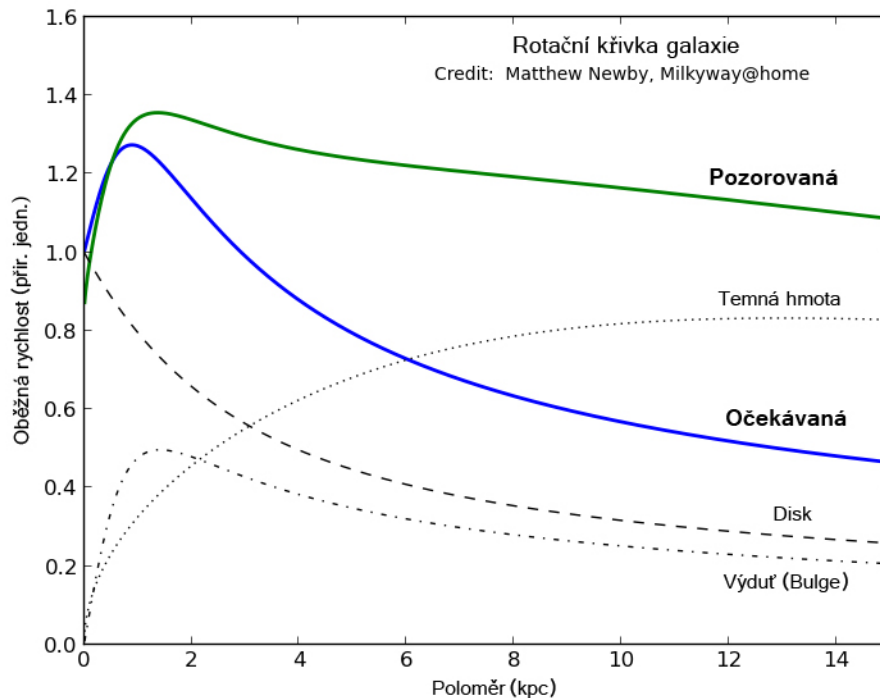
V následující kapitole rozebereme problematiku galaktických gravitačních potenciálů a podrobněji popíšeme námi použité potenciály eliptických galaxií. Informace byly čerpány z [A] a [D] .

2.1 Gravitační potenciály galaxií

Jelikož potenciál neumíme přímo měřit, je třeba jeho tvar získat z měřitelné veličiny závislé na potenciálu. U spirálních galaxií je možné funkci potenciálu určit z profilu oběžné rychlosti materiálu galaxie. Spektroskopickými metodami můžeme změřit radiální rychlosti plynné i hvězdné složky spirální galaxie v závislosti na vzdálenosti od centra galaxie. Z gravitačního zákona pak plyne jasná závislost mezi průběhem oběžné rychlosti a rozložením hmoty systému. Ale jak už jste nejspíš slyšeli, tak u galaxií se tato závislost neshoduje s pozorovanou hustotou svítivé látky.

Jestliže určíme funkci hustoty z plošné jasnosti galaxie, pak odpovídající oběžné rychlosti budou velmi odlišné od těch pozorovaných. Abychom získali pozorovanou křivku, je potřeba přičíst působení nepozorované gravitačně interagující složky, kterou nazýváme *temnou* nebo *skrytou hmotou*. O povaze doplňující složky toho není

mnoho známo. Její vliv pozorujeme na galaxiích a galaktických kupách. Obrázek 2.1 ukazuje příklad, jak jednotlivé části spirální galaxie ovlivňují rotační křivku.



Obrázek 2.1: Rotační křivka spirální galaxie je tvarována působením několika komponent.

[Credit: Matthew T. Newby, Milkyway@home]

Upraveno z [8].

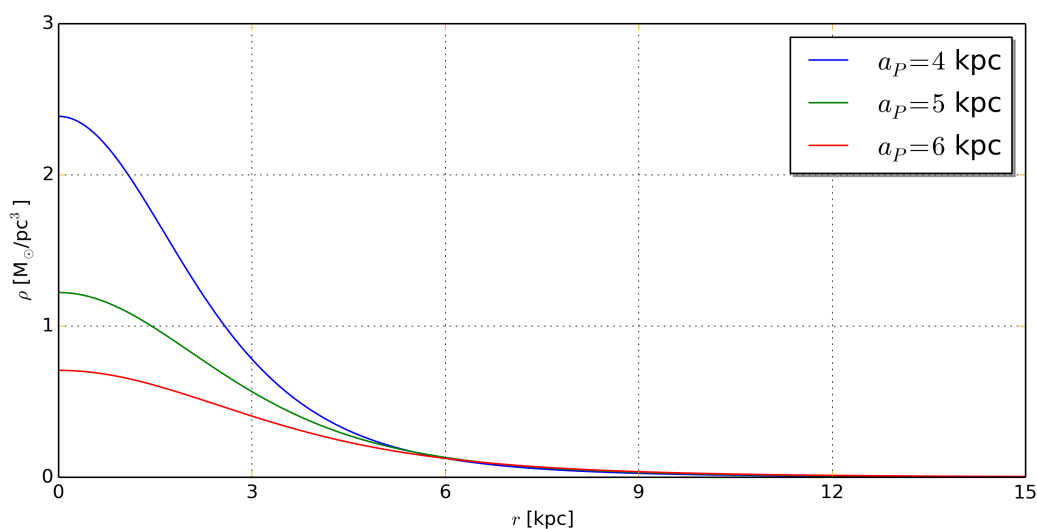
U eliptických galaxií je určení potenciálu z měření oběžných rychlostí prakticky nemožné kvůli velké nahodilosti hvězdných orbit a nedostatečnému množství plynu. K získání tvaru potenciálu nebo alespoň jeho charakteristik je potřeba užití jiných metod. Jednou z těchto metod je právě simulace vzniku slupek. Porovnáváním charakteristik namodelovaných a pozorovaných slupek můžeme podpořit nebo zpochybnit korektnost použitého potenciálu. Úkolem našeho modelu je zjišťování důsledků vzniklých nahrazením nejčastěji používaného Plummerova potenciálu kosmologicky motivovaným NFW potenciálem. Pojdme si oba potenciály popsat podrobněji.

2.1.1 Plummerův potenciál

Změříme-li průběh plošné jasnosti eliptických galaxií pomocí fotografické fotometrie za použití pozemských dalekohledů, dostaneme profil klesající pro velké vzdálenosti k hodnotě pozadí s plochým středem. Pokud si eliptickou galaxii zjednodušíme na sférickou, tak tomuto profilu dobře odpovídá Plummerův profil hustoty používaný původně pro hvězdokupy. Radiální závislostí hustoty je

$$\rho(r) = \left(\frac{3M}{4\pi a_P^3} \right) \left(1 + \frac{r^2}{a_P^2} \right)^{-\frac{5}{2}}, \quad (2.1)$$

kde M je hmotnost objektu a a_P je Plummerův poloměr, který určuje centrální koncentraci hmoty.



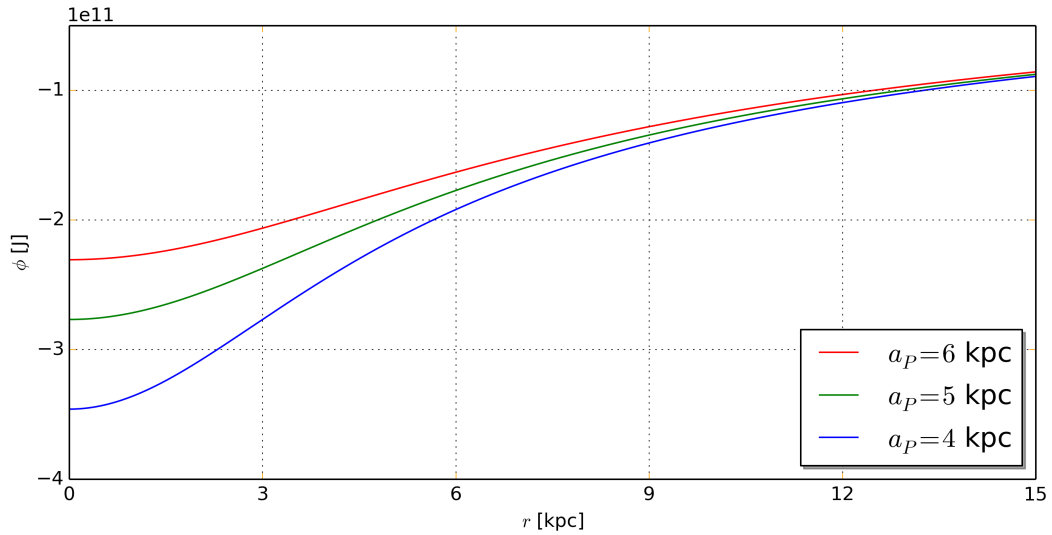
Obrázek 2.2: Plummerův profil hustoty s různými hodnotami Plummerova poloměru pro $M = 3.2 \cdot 10^{11} M_\odot$.

Z Poissonovy rovnice

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \quad (2.2)$$

získáme tvar potenciálu

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{\sqrt{r^2 + a_P^2}}. \quad (2.3)$$



Obrázek 2.3: Plummerův potenciál pro různé hodnoty Plummerova poloměru s $M = 3.2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$.

Jeden z problémů použití Plummerova modelu pro eliptické galaxie je v neuvážení vlivu temné hmoty – je založen na průběhu jasnosti svítivé látky. Měření vesmírnými teleskopy navíc prokázalo, že pro většinu eliptických galaxií byla plochá oblast průběhu jasnosti v blízkosti centra dána omezenou rozlišovací schopností dalekohledů způsobenou seeingem. Moderní měření s vyšší rozlišovací schopností sledují profil, jehož míra stoupání sice upadá, ale nikdy se nedostane na nulu.

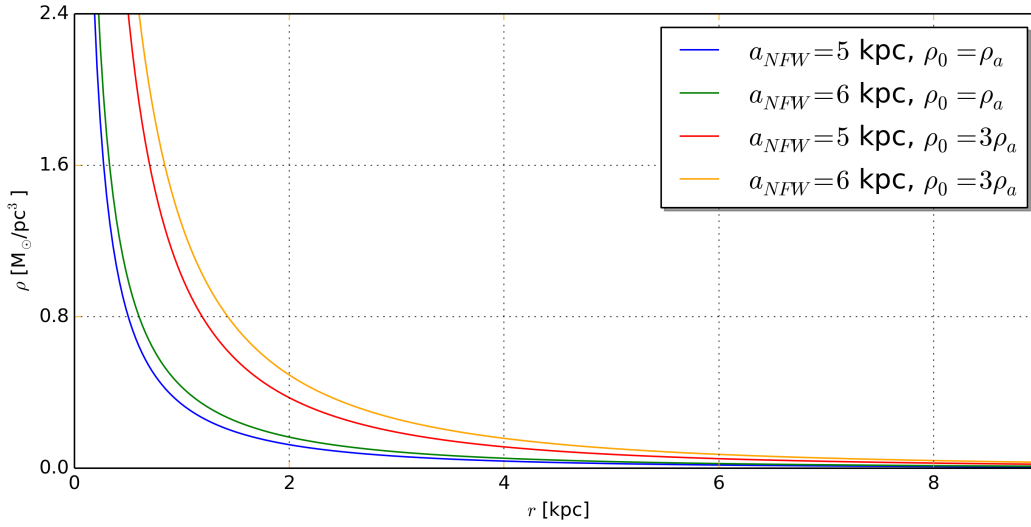
I přes uvedené problémy byl Plummerův potenciál použit ve velké části simulací dynamiky eliptických galaxií, včetně srážkových simulací vedoucích ke vzniku slupkových galaxií.

2.1.2 NFW potenciál

Na základě N-částicových simulací vývoje sférických hal temné hmoty publikovali Navarro, Frenk a White článek [E]. Z analýzy výsledných dat získali autoři hustotní profil, který fitoval hala temné hmoty o hmotnostech od trpasličích galaxií až po hmotnosti galaktických kup. Tvar funkce hustotního profilu je

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/a_{NFW})(1+r/a_{NFW})^2}, \quad (2.4)$$

kde ρ_0 a a_{NFW} jsou volné parametry, které jsou vzájemně provázány a jejich volba ovlivňuje celkovou hmotnost. Škálovou délkou a_{NFW} je ovlivněna centrální koncentrace hmoty.



Obrázek 2.4: NFW hustotní profil pro různé hodnoty a_{NFW} a ρ_0 . $\rho_a = 6.63 \cdot 10^{-21}$ kg/m³, volbu její hodnoty popíšeme v podkapitole 4.1.

Hmotnost objektu do poloměru r získáme integrací hustoty přes objem

$$M(r) = 4\pi \int_0^r r^2 \rho(r) dr. \quad (2.5)$$

Pro NFW hustotní profil vychází hmotnost jako

$$M(r) = 4\pi \rho_0 a_{NFW}^3 \ln(1+r/a_{NFW}) - \frac{r/a_{NFW}}{1+r/a_{NFW}}. \quad (2.6)$$

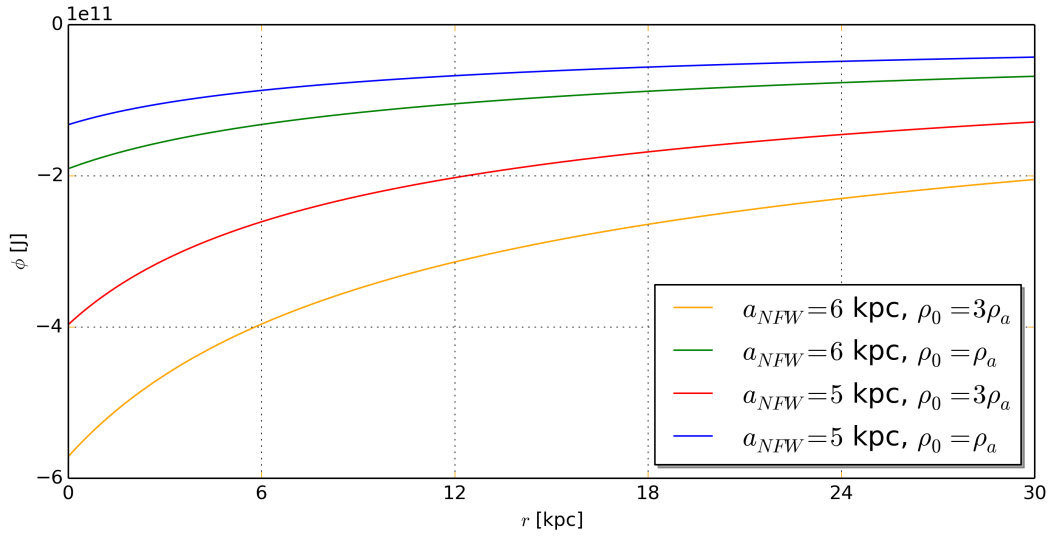
Celková hmotnost s $r \rightarrow \infty$ je nekonečná. To lze řešit integrací do konečné vzdálenosti. Nejčastěji se používá vzdálenost, ve které je gravitační vliv objektu stejně velký jako vliv okolí.

Gravitační potenciál získáme z funkce hmotnosti jako

$$\Phi(r) = -G \int_r^\infty \frac{M(r)}{r^2} dr. \quad (2.7)$$

Pro NFW nám vychází

$$\Phi(r) = -4\pi G \rho_0 a_{NFW}^2 \frac{\ln(1 + r/a_{NFW})}{r/a_{NFW}}. \quad (2.8)$$



Obrázek 2.5: NFW gravitační potenciál pro různé hodnoty a_{NFW} a ρ_0 . $\rho_a = 6.63 \cdot 10^{-21}$ kg/m³, volbu její hodnoty popíšeme v kapitole 3.3.

NFW profil odpovídá současným astrofyzikálním teoriím mnohem lépe než Plummerův profil. I když je odvozen jen ze simulací temné hmoty, dá se použít pro popis celé galaxie. Podle dnešních předpokladů je totiž většina hmotnosti galaxií obsažena v temné hmotě.

Kapitola 3

Pohyb částice v potenciálu

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, nahradíme potenciál, který je ve skutečnosti tvarován veškerou hmotou galaxie, jednoduchou sféricky symetrickou funkcí. Částice, které budou reprezentovat materiál sekundární galaxie, tak nebudou ovlivňovat tvar potenciálu, a tím pádem nebudou ani vzájemně interagovat. Dobrou představu o pohybu částic si proto můžeme udělat i při sledování jedné částice.

3.1 Pohybové rovnice

Z tvaru potenciálu získáme jednoduše pohybovou rovnici ze vztahu

$$m\ddot{\mathbf{r}} = -\nabla\phi. \quad (3.1)$$

Dosažením Plummerova potenciálu dostaneme pro vektor zrychlení

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM\mathbf{r}}{(r^2 + a_P^2)^{3/2}} \quad (3.2)$$

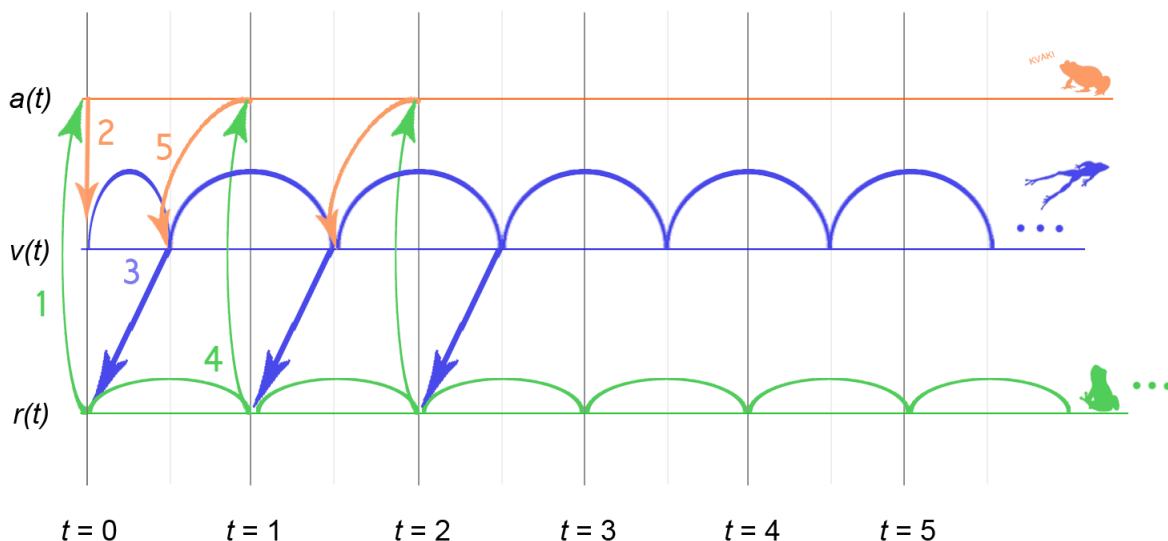
a obdobně dosažením NFW potenciálu

$$\ddot{\mathbf{r}} = -4\pi G\rho_0 a_{NFW}^3 \frac{\mathbf{r} \left[\frac{a_{NFW} \ln(1+r/a)}{r} + \ln(1+r/a_{NFW}) - 1 \right]}{r^2 (r + a_{NFW})}. \quad (3.3)$$

Tyto dvě rovnice neumíme řešit analyticky a je potřeba je řešit numericky.

3.2 Numerické řešení rovnic metodou Leap-frog

Často používanou metodou pro numerické řešení pohybových rovnic je metoda Leap-frog. Tato metoda rozkládá obecný pohyb částice na sadu rovnoměrně zrychlených pohybů. K podrobnějšímu rozboru bude užitečný obrázek.



Obrázek 3.1: Schéma Leap-frog metody.

Na vodorovné ose je čas v jednotkách časového kroku¹. Na svislé ose je schématicky znázorněná poloha $r(t)$, rychlost $v(t)$ a zrychlení $a(t)$.

1. Na začátku v čase $t = 0$ musíme znát počáteční polohu $r(0)$ a rychlost $v(0)$. Dosazením počáteční polohy do rovnice pro zrychlení (např. rovnice 3.3) získáme hodnotu počátečního zrychlení $a(0)$.
2. Abychom s pohybem v jednotlivých krocích mohli snadno zacházet jako s rovnoměrně zrychleným pohybem, posuneme čas počítané rychlosti o půl kroku dopředu $v(0.5) = v(0) + a(0) \cdot \Delta t/2$. Získáme tak hodnotu průměrné rychlosti mezi krokem 0 a 1.
3. Ze znalosti průměrné rychlosti $v(0.5)$ už snadno spočítáme polohu v následujícím časovém kroku $r(1) = r(0) + v(0.5) \cdot \Delta t$.

4. Dosazením polohy $r(1)$ do rovnice pro zrychlení dostaneme zrychlení $a(1)$.
5. Ze zrychlení $a(1)$ spočítáme další rychlost jako $v(1.5) = v(0.5) + a(1) \cdot \Delta t$.

Dál už se kroky 3, 4 a 5 opakují a rovnice jde obecně napsat

$$r(t + 1) = r(t) + v(t + 0.5) \cdot \Delta t \quad (3.4)$$

$$a(t + 1) = f(r(t + 1)) \quad (3.5)$$

$$v(t + 1 + 0.5) = v(t + 0.5) + a(t + 1) \cdot \Delta t. \quad (3.6)$$

V této formě je snadné z rovnic vytvořit algoritmus a nechat řešení rovnic na počítači. Příklad takového algoritmu najdete v příloze I.

¹Délka kroku je volitelná a čím je krok kratší, tím je numerické řešení přesnější. Kratších kroků je ale potřeba udělat více, což navýší výpočetní čas. Délku kroku je proto třeba zvolit rozumně vzhledem k problému, který řešíme.

3.3 Rozbor pohybu částice v obou potenciálech

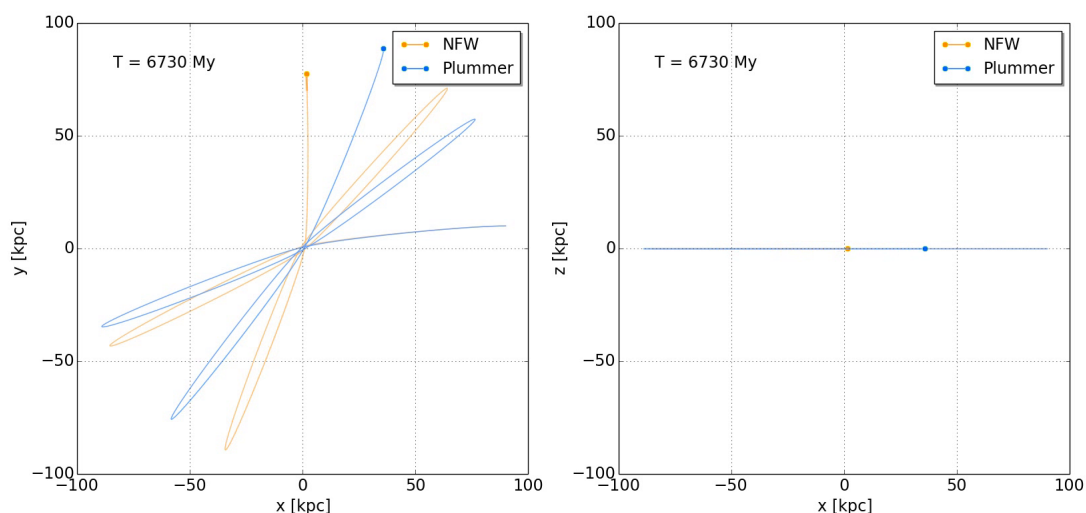
Abychom mohli srovnávat dráhy částice v obou potenciálech, musíme zvolit jejich volné parametry tak, aby oba popisovaly obdobnou galaxii.

Plummerův potenciál má dva volné parametry, Plummerův poloměr a_P a hmotnost objektu M . Plummerovu délku zvolíme 5 kpc a hmotnost $3.2 \cdot 10^{11} M_\odot$, což odpovídá typické eliptické galaxii.

Volné parametry NFW potenciálu jsou také dva, škálová délka a_{NFW} určující centrální koncentraci a parametr s rozměrem hustoty ρ_0 . Za podmínky stejné hmotnosti jako v Plummerově modelu při integraci hustoty do 100 kpc nám dle korelace mezi parametry popsané v článku [E] vychází, že škálovou délku a_{NFW} můžeme zvolit stejnou jako Plummerův poloměr a_P tedy 5 kpc. ρ_0 pak vychází $6.63 \cdot 10^{-21} \text{ kg/m}^3$.

Volba parametrů tak, aby byly ekvivalentní, není zcela jednoznačná. Neurčitost v jejich volbě by však při hledání charakteristických vlastností slupek vzniklých v jednotlivých potenciálech neměla hrát roli.

Nyní už nám nebrání nic v tom, abychom vypustili částice do obou potenciálů a podívali se, co se bude dít. Počáteční polohu zvolíme $\mathbf{r}_0 = (90, 10, 0)$ kpc a počáteční rychlost $\mathbf{v}_0 = (-40, 0, 0)$ km/s.

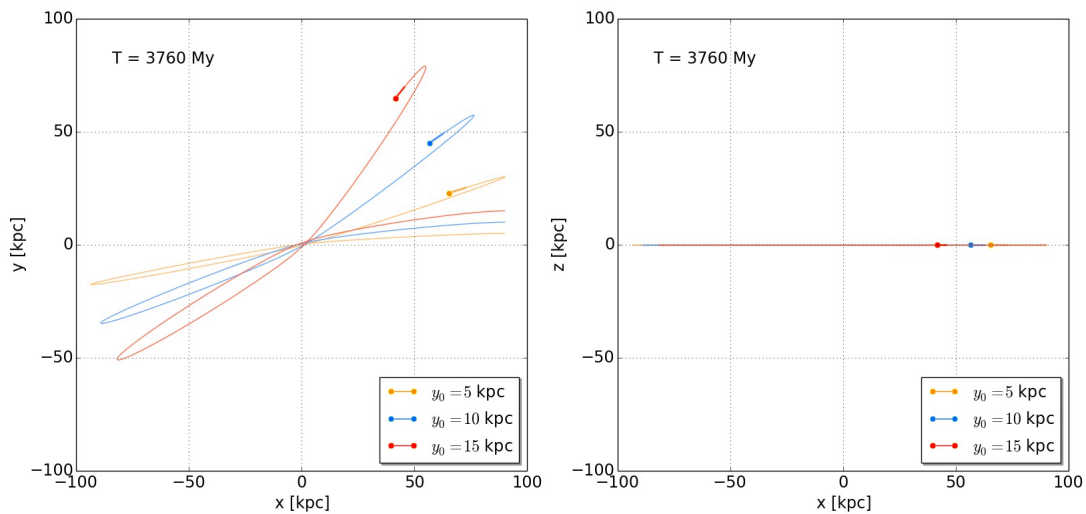


Obrázek 3.2: Porovnání pohybu částice v NFW a Plummerově potenciálu. Pro větší názornost se můžete podívat na animaci pohybu na této [adrese \[Λ\]](#).

Z obrázku a animace² je zřejmé, že částice v NFW potenciálu je při průletu kolem středu odkloněna více než částice v Plummerově potenciálu. To odpovídá strmějšímu nárůstu hustoty ve středu NFW profilu.

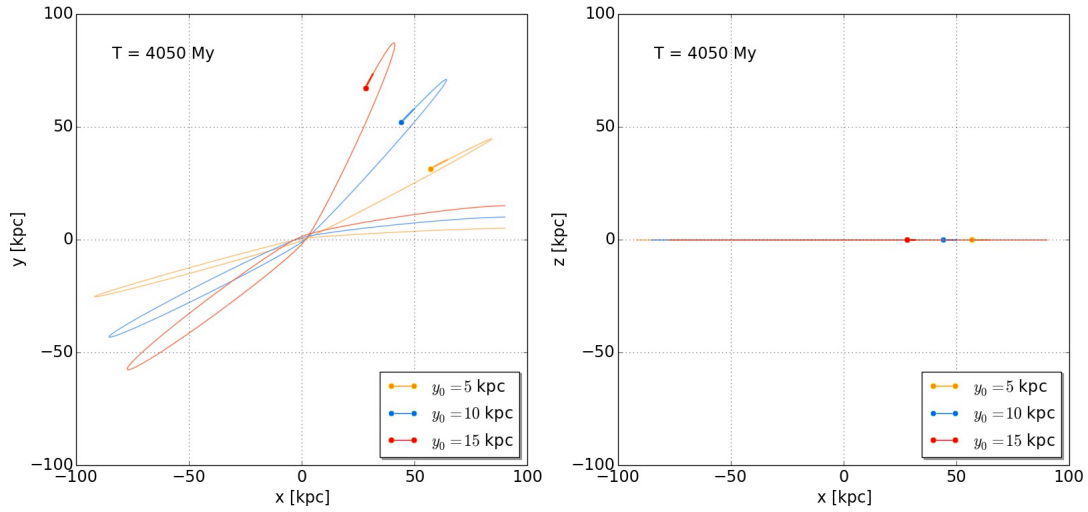
Zjistěme, jak se bude odklon částice měnit v obou potenciálech při různých drahách. Velikost odklonu bude závislá na vzdálenosti, s jakou trajektorie částice mívá střed galaxie, a na rychlosti, kterou kolem středu poletí. Pokud částice poletí přes střed, bude odklon nulový, protože výslednice zrychlení bude rovnoběžná se směrem dráhy. S rostoucí vzdáleností od středu bude odklon růst. Naopak čím větší bude rychlost průletu kolem středu, tím kratší dobu bude na částici působit velké zrychlení v blízkosti středu způsobující odklon dráhy.

Zafixujme si vektor počáteční rychlosti na $\mathbf{v}_0 = (-40, 0, 0)$ km/s a volme různé hodnoty y -ové složky počátečního vektoru polohy $\mathbf{r}_0 = (90, y_0, 0)$ kpc.



Obrázek 3.3: 3 částice v Plummerově potenciálu s různým y_0 . Animaci si můžete pustit na této [adrese](#) ^[β].

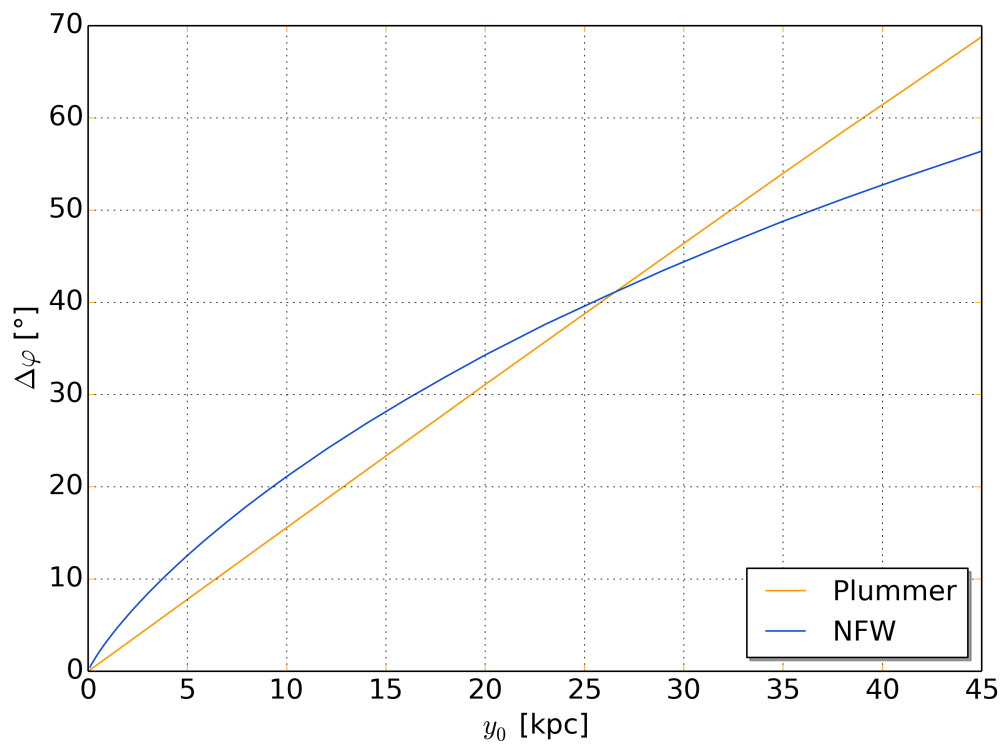
²Program, který vám z výstupního souboru programu v příloze I vytvoří animaci, naleznete v příloze II.



Obrázek 3.4: 3 částice v NFW potenciálu s různým y_0 . Animaci najdete na této adrese [7].

Výsledky odpovídají předpokladům – s rostoucím y_0 roste odklon $\Delta\varphi$. Pro hodnoty y_0 5, 10 a 15 kpc je odklon v NFW potenciálu větší než v Plummerově potenciálu. Otázka je, jestli to tak bude pro libovolné y_0 a jak se bude rozdíl odklonu měnit.

Vypustíme tedy více částic s různými hodnotami y_0 a budeme měřit hodnotu odklonu $\Delta\varphi$. Obrázek a animace s tolika částicemi by byly hodně nepřehledné, proto rovnou ukážeme naměřenou závislost.



Obrázek 3.5: Závislost úhlu odklonu $\Delta\varphi$ na y_0

Ze závislosti na obrázku 3.5 jde vidět trendový rozdíl pro jednotlivé potenciály. Nárůst odklonu $\Delta\varphi$ je pro menší hodnoty y_0 strmější v případě NFW potenciálu. Ve větších y_0 nárůst pozvolna klesá na rozdíl od nárůstu odklonu v Plummerově potenciálu, který si drží konstantní hodnotu.

Tento rozdíl by se měl měřitelně projevit na parametrech slupek v jednotlivých potenciálech. Konkrétně by se měl změnit úhel rozevření slupek a průběh jejich plošné hustoty vzhledem k úhlu od osy srážky. Nezbyvá než zjistit, zda tento předpoklad potvrdí simulace.

Kapitola 4

Simulace vzniku slupkových galaxií

Z předcházející kapitoly víme, jak simulovat pohyb částice v gravitačním potenciálu galaxie. V této kapitole zkusíme z několika částic vytvořit menší galaxii a tu nechat srazit s větší galaxií tak, aby vznikly slupky.

4.1 Představení našeho modelu

Možných scénářů srážek galaxií je v podstatě nekonečně mnoho. Takových srážek, při kterých vzniknou útvary podobné slupkám, je sice méně¹, ale i tak je potřeba si vybrat z několika možností.

Jak už bylo řečeno, tak slupky se nejčastěji tvoří při srážce galaxií s poměrem hmotností v řádu desítek až stovek. My si zvolíme poměr 1/100.

Parametry primární galaxie necháme shodné jako v předchozí kapitole. Pro Plummerův potenciál bude hmotnost galaxie $M = 3.2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ a Plummerova délka $a_P = 5$ kpc. V NFW potenciálu máme $a_{NFW} = 5$ kpc a $\rho_0 = 6.63 \cdot 10^{-21} \text{ kg/m}^3$. (Metoda volby těchto parametrů je popsána v podkapitole 3.3.)

Sekundární galaxie bude tvořena milionem testovacích částic. Jejich počáteční polohy a rychlosti v sekundární galaxii jsou určeny distribuční funkcí² pro Plummerovu sféru s Plummerovým poloměrem 500 pc a hmotností stonásobně menší než je hmotnost primární galaxie M . Gravitační potenciál sekundární galaxie odpovídá parametrům zvolené Plummerovy sféry a je zapnutý do okamžiku srážky. Poté se sekundární galaxie rozpadne a její potenciál je deaktivován.

Sekundární galaxii vypustíme ze vzdálenosti 90 kpc po parabolické dráze směřující do středu primární galaxie.

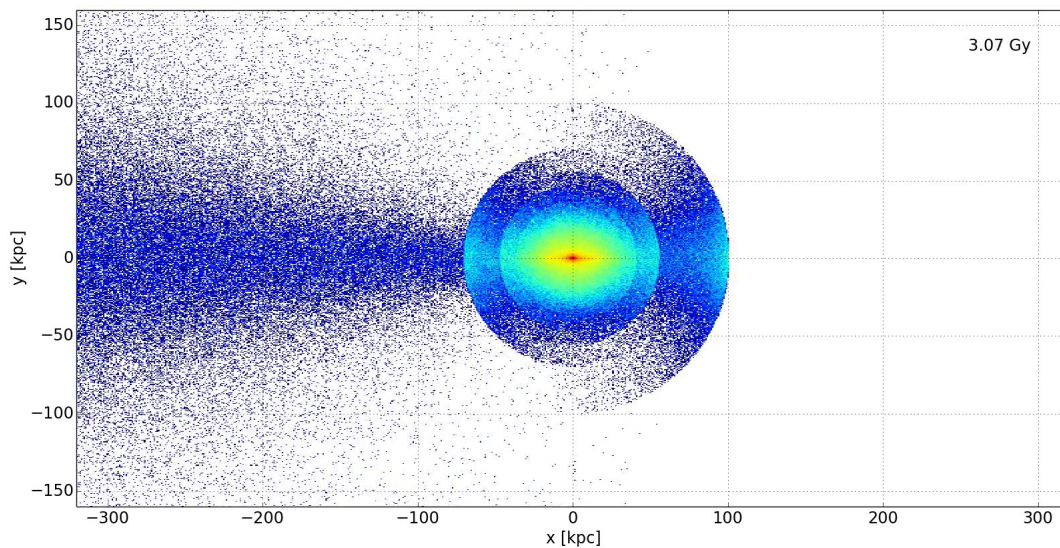
¹Méně zde znamená stále nekonečně mnoho, ale je to menší nekonečno než to předchozí...

²Podrobnější informace o distribuční funkci naleznete v kapitole 4.3 knihy [A].

Algoritmy, které použijeme na počítání obou simulací, jsou upraveny z programu dodaného vedoucím práce dr. Brunem Jungwiertem. Původní verzi najdete v příloze III. Upravenou verzi s Plummerovým potenciálem pak v příloze IV a verzi s NFW potenciálem v příloze V.

4.2 Rozbor slupek v obou potenciálech

Vykreslením výstupů z našich programů dostaneme pro Plummerův potenciál následující obrázek³ a animaci⁴.

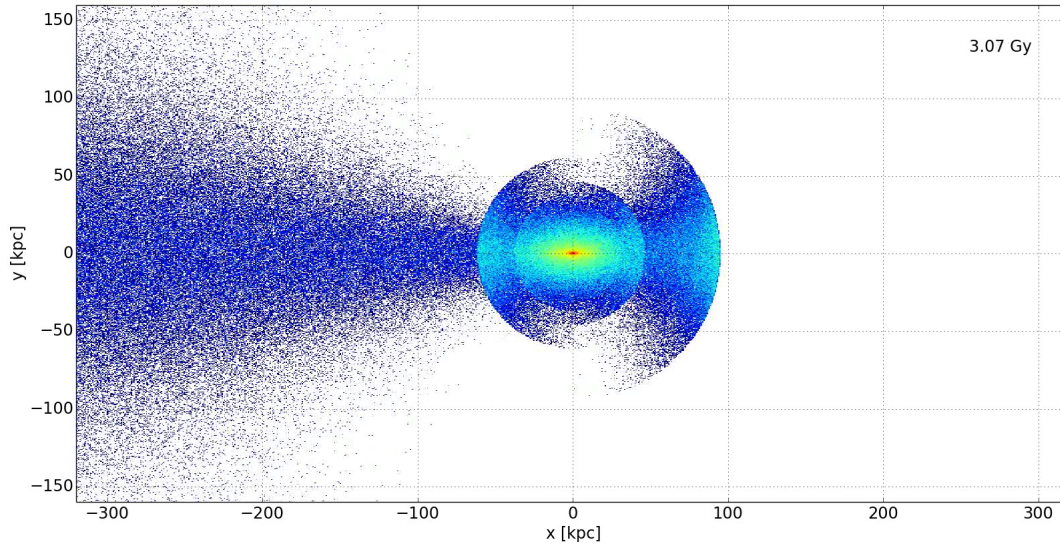


Obrázek 4.1: Slupky v Plummerově potenciálu v čase 3,07 Gy po spuštění simulace. Souřadnicová soustava má počátek v těžišti systému. Po srážce je počátek soustavy totožný se středem primární galaxie. Primární galaxie zde pro lepší viditelnost slupek není zobrazena stejně jako v ostatních případech. Animaci najdete na [adrese \[δ\]](#) a druhou verzi s jinou metodou zobrazení na [adrese \[ε\]](#).

³Program, který z výstupu programů IV a V vykreslí jednotlivé slupky, najdete v příloze VI.

⁴Program na vytvoření animace z výstupu programů IV a V se nachází v příloze VII.

Vykreslením výsledků simulace v NFW potenciálu získáme obdobný obrázek a animaci.



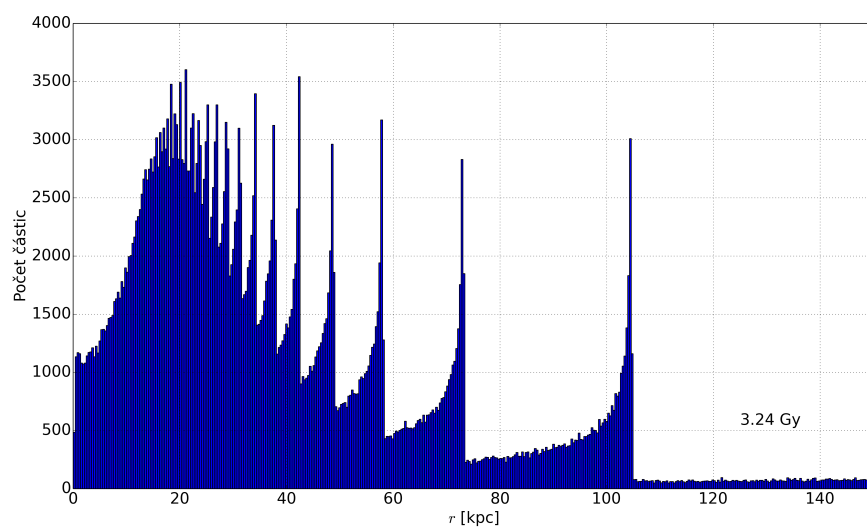
Obrázek 4.2: Slupky v NFW potenciálu v čase 3,07 Gy po spuštění simulace. Animaci najdete na [adrese \[ζ\]](#) a druhou verzi na [adrese \[η\]](#).

Při prvním pohledu na oba obrázky nezjistíme žádné velké rozdíly. Snadno viditelná je pouze odlišná vzdálenost slupek od středu ve stejném čase po spuštění simulace. Čas od spuštění simulace do srážky je ale v obou potenciálech rozdílný, proto je tento rozdíl zavádějící. Pojdme analyzovat slupky podrobněji.

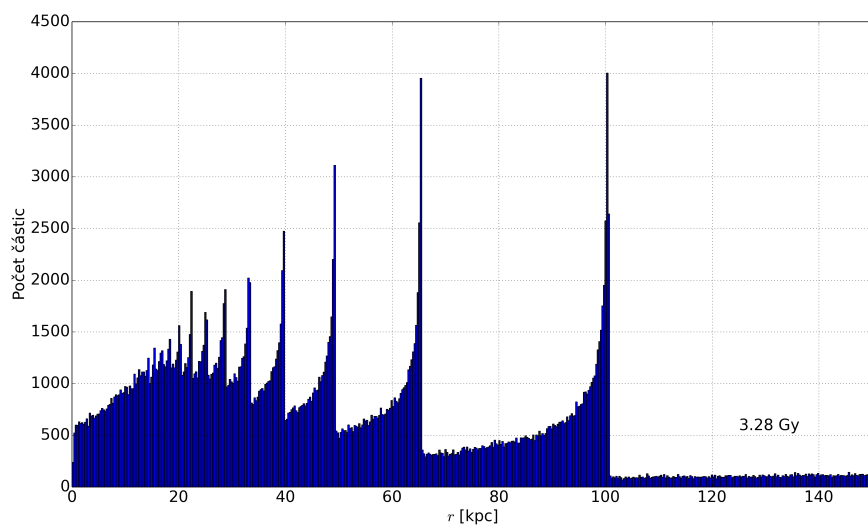
4.2.1 Vývoj poloměru slupek v čase

Z animací je pěkně vidět, jak slupky s časem postupně rostou. V této části kapitoly zjistíme, zda se růst slupek pro oba potenciály nějak významněji liší.

Pokud vykreslíme histogram částic sekundární galaxie v závislosti na vzdálenosti od středu primární galaxie, dostaneme pro naše potenciály následující obrázky. Na rozdíl od obrázků a animací v předchozí části kapitoly, kde rozlišíme přibližně pět slupek, je na histogramech vidět slupek několikanásobně víc.

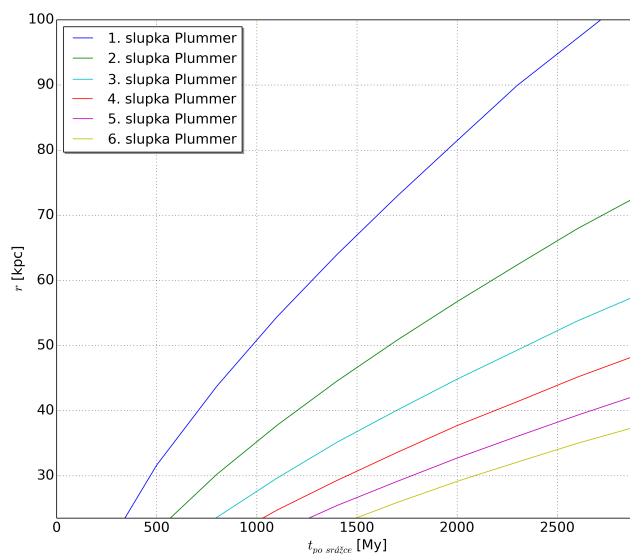


Obrázek 4.3: Histogram částic v Plummerově potenciálu vzhledem k vzdálenosti od středu primární galaxie v čase 3.24 Gy po začátku simulace – 2.9 Gy po srážce.

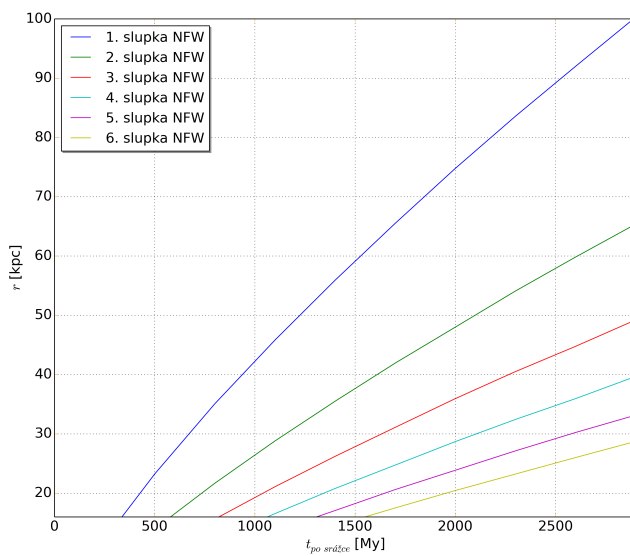


Obrázek 4.4: Histogram částic v NFW potenciálu vzhledem k vzdálenosti od středu primární galaxie v čase 3.28 Gy po začátku simulace – 2.9 Gy po srážce.

Sledujeme-li vývoj poloměrů slupek v čase, dostaneme tyto grafy.



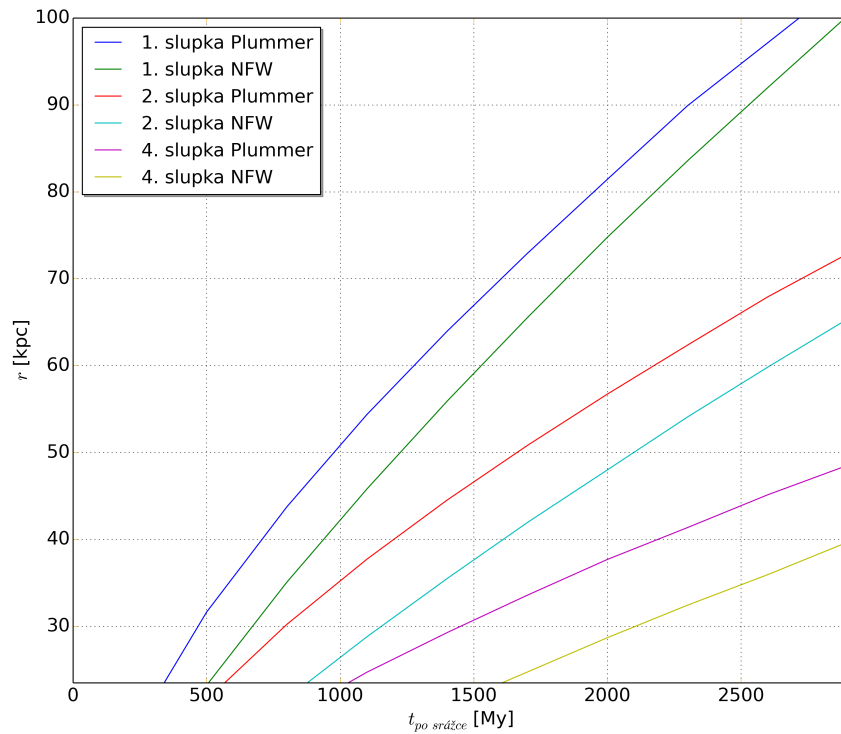
Obrázek 4.5: Časový vývoj poloměru slupek v Plummerově potenciálu.



Obrázek 4.6: Časový vývoj poloměru slupek v NFW potenciálu.

Časové průběhy poloměrů slupek v obou potenciálech jsou velmi podobné. Vložením naměřených závislostí do jednoho obrázku zjistíme, že jsou sady křivek posunuté v čase. Rozdíly mezi poloměry jednotlivých slupek v určitém čase jsou téměř totožné v obou potenciálech.

Odlišnosti obhajující jeden či druhý potenciál by tak byly jen velmi obtížně pozorovatelné, a jelikož je naše simulace v mnoha směrech zjednodušená, nejspíše nemá smysl se o to ani pokoušet.

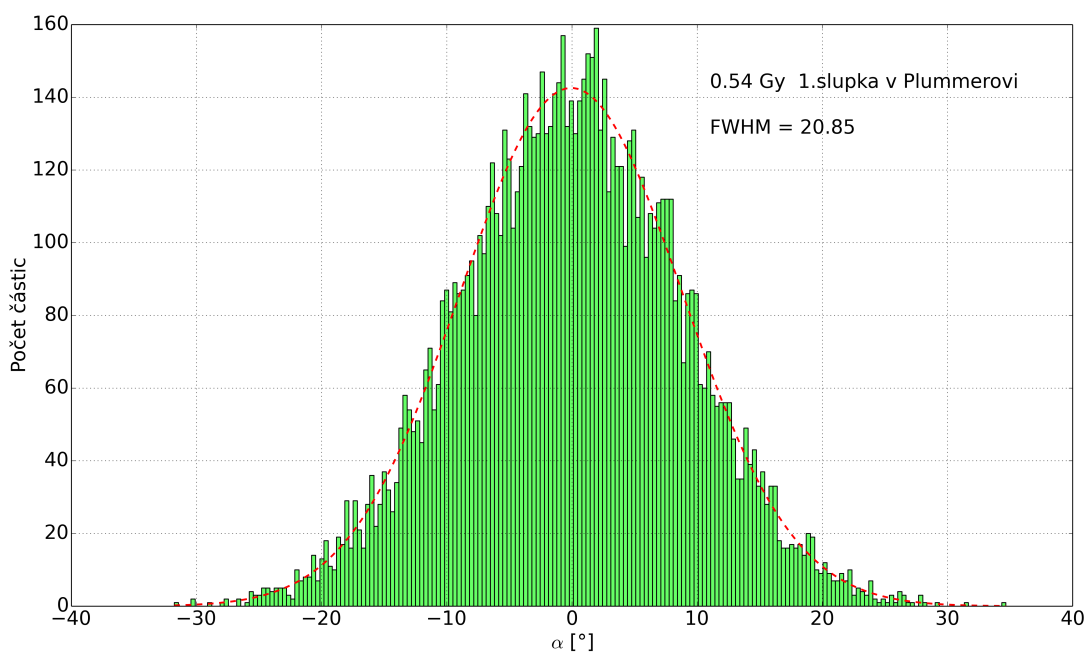


Obrázek 4.7: Porovnání časového vývoje poloměru slupek v Plummerově a NFW potenciálu. Pro přehlednost jsme vykreslili jen slupky 1, 2 a 4.

4.2.2 Vývoj úhlu rozevření slupek v čase

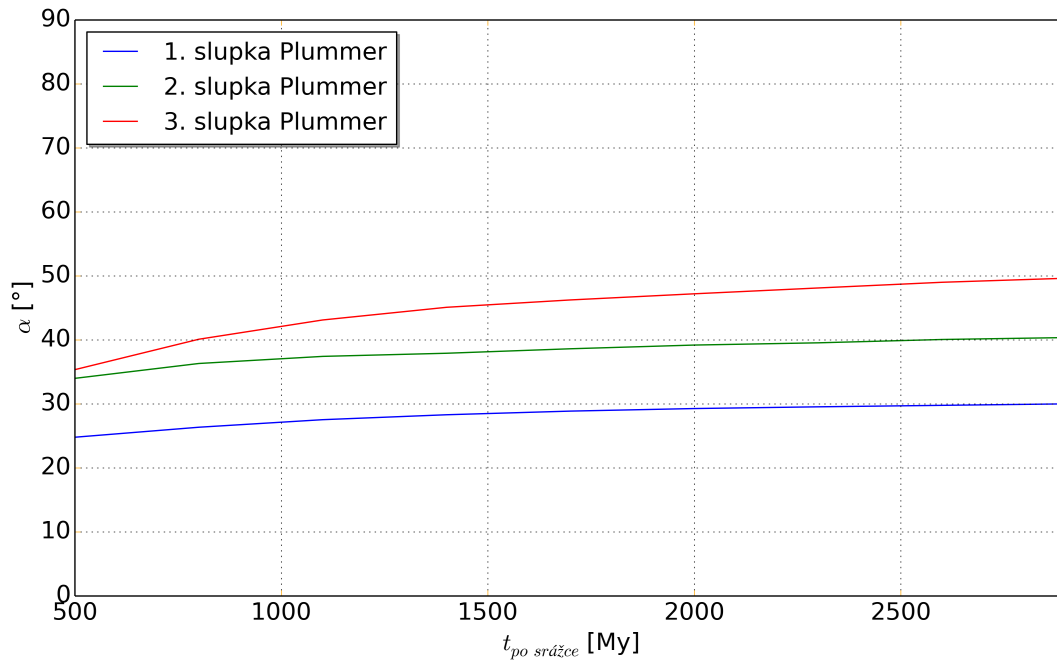
Při simulaci pohybu jedné částice v našich dvou potenciálech na obrázku 3.2 jsme zaznamenali rozdíl v odklonu trajektorie. Řekli jsme, že rozdílný odklon by se měl projevit odlišným průběhem plošné hustoty slupek v závislosti na úhlu od osy srážky. Označme si tento úhel α a vyberme částice, které vykreslují z našeho pohledu slupku.

Zobrazením histogramu částic slupky v Plummerově potenciálu vzhledem k úhlu α dostaneme průběh odpovídající Gaussově rozdělení. Jelikož je částic mnoho, bude užitečné vyjádřit informaci o jejich úhlovém rozdělení jedním z parametrů Gaussovy křivky. Vybereme si plnou šířku v polovině maxima, anglicky full width at half maximum – FWHM.



Obrázek 4.8: Histogram částic první slupky v Plummerově potenciálu v závislosti na úhlu α v čase 0.54 Gy po spuštění simulace, tedy přibližně 0.2 Gy po srážce. Přerušovanou červenou čarou je znázorněná fitovaná Gaussova funkce.

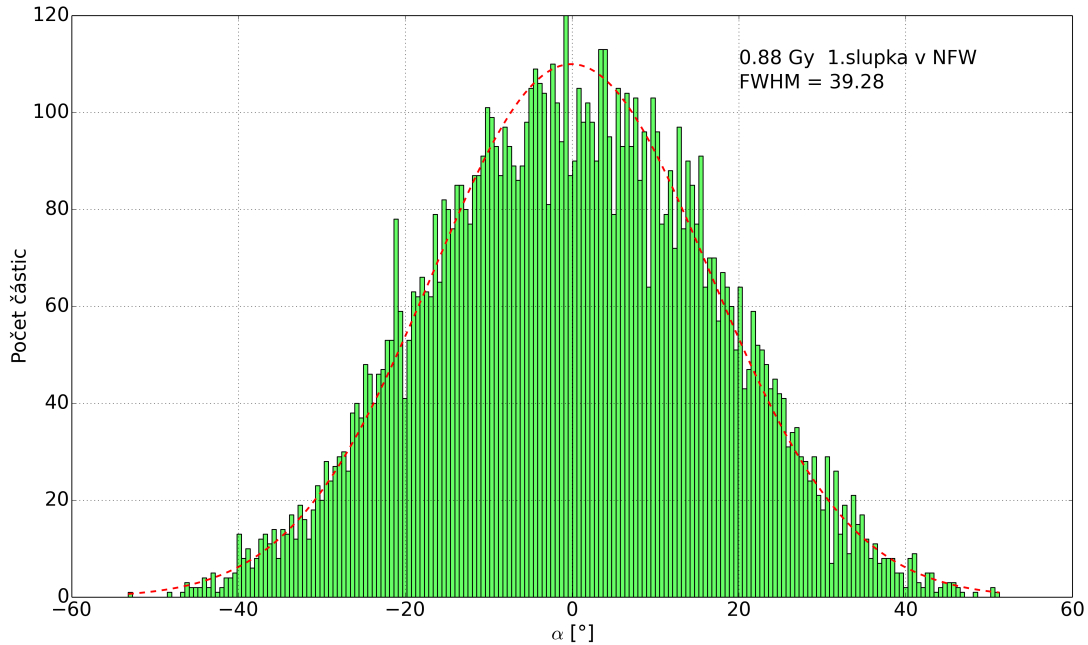
Podívejme se, jak se FWHM úhlu α bude vyvíjet v čase. Dále pro zjednodušení značíme FWHM úhlu α jen jako α . Časový průběh jde dobře určit pro první tři slupky od času 0.5 Gy po srážce. Pro další slupky jsou histogramy příliš zašuměné.



Obrázek 4.9: Časový průběh α pro první tři slupky v Plummerově potenciálu. Na x -ové ose je čas po srážce v milionech let.

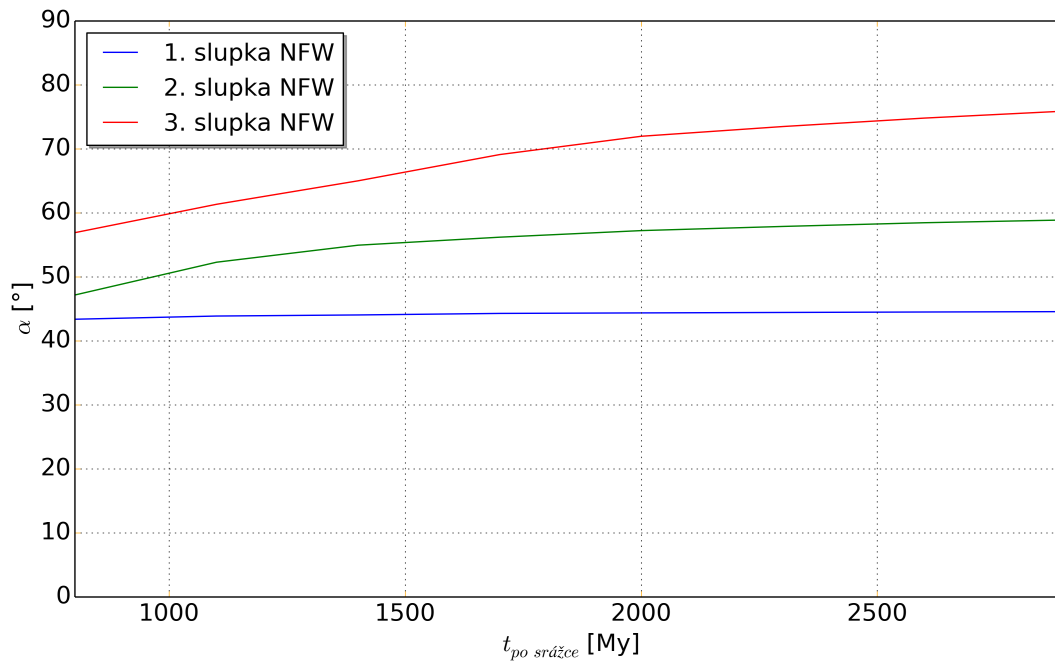
Z grafu vidíme, že α pozvolna roste s časem a je vyšší pro mladší slupky. Jde si toho všimnout i na obrázcích a animacích v podkapitole 4.2. Slupky jsou číslovány podle stáří a vytvářejí se střídavě na straně přilétající galaxie (vpravo) a na straně opačné (vlevo). Vidíme-li na obrázku 4.1 3 slupky, budou číslovány zprava 1, 3 a 2.

V NFW potenciálu stejně jako v Plummerově odpovídá histogram částic v závislosti na úhlu α Gaussovu rozdělení. Na první pohled je rozdělení pro první slupku v čase 0.2 Gy po srážce širší než bylo v Plummerově potenciálu. FWHM je téměř dvojnásobné.



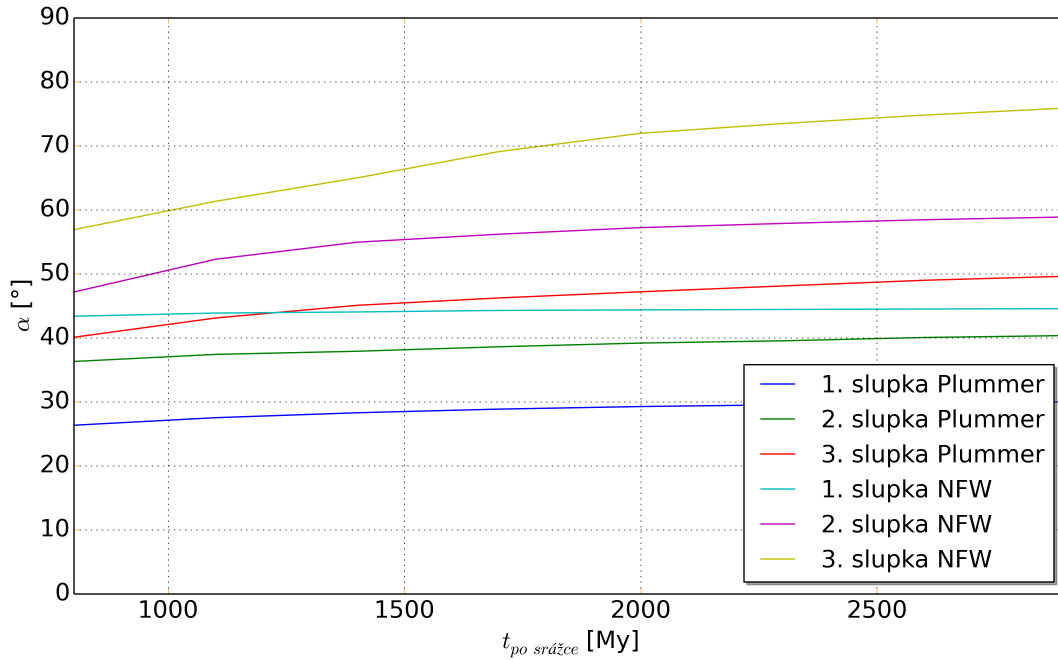
Obrázek 4.10: Histogram částic první slupky v NFW potenciálu v závislosti na úhlu α v čase 0.58 Gy po spuštění simulace což odpovídá 0.2 Gy po srážce. Přerušovanou červenou čarou je znázorněná fitovaná Gaussova funkce.

S vyhodnocováním úhlového rozložení materiálu slupek budeme zacházet stejně jako v předchozím případě. Po třetí slupce jsou histogramy obdobně zašuměné jako v předešlém případě, a proto budeme sledovat časový vývoj jen prvních tří slupek. Začneme v čase 0.8 Gy po srážce, kdy jdou bez potíží rozlišit první tři slupky.



Obrázek 4.11: Časový průběh α pro první tři slupky v NFW potenciálu. Na x -ové ose je čas po srážce v milionech let.

Stejně jako v případě slupek v Plummerově potenciálu dostáváme pozvolna rostoucí závislosti s vyššími hodnotami pro mladší slupky. Rozdíl však je v hodnotě plné šířky v polovině maxima v jednotlivých časech. Vykresleme si průběhy pro oba potenciály do jednoho grafu.



Obrázek 4.12: Časový průběh α pro první tři slupky v Plummerově a NFW potenciálu. Na x -ové je čas po srážce v milionech let.

Hodnoty FWHM úhlu α jsou v NFW potenciálu téměř dvojnásobné oproti slupkám stejné generace v Plummerově potenciálu ve stejných časech po srážce galaxií. Strmost růstu α je také očividně vyšší v NFW potenciálu.

Úhlové rozdělení částic je tedy prokazatelně odlišné a říká, že částice slupek v NFW potenciálu dosahují v průměru většího úhlu od osy srážky než částice slupek v Plummerově potenciálu.

Z analýzy plošné jasnosti slupek by mělo být možné získat data podporující jeden nebo druhý potenciál. Potvrdil se tedy náš předpoklad získaný na základě rozboru pohybu jedné částice v podkapitole 3.3.

Závěr

Cíle této práce byly tři.

První byl zdokonalit se v základech modelování galaktické dynamiky se vším, co k tomu patří. Díky teoretickému základu, získanému na přednáškách předmětů F7567 Struktura a kinematika galaxií a F8567 Dynamika a vývoj galaxií, nebylo pochopení základů galaktické fyziky nijak obtížné. Hodně jsem se také naučil z technické stránky věci. Programování k astrofyzice patří a mnohem lépe se mi v něm zdokonalovalo na praktických příkladech, jako byl výpočet pohybu částice v potenciálu a zpracování velkého souboru dat s výslednými polohami. Tento cíl považuji za splněný a jsem rád, že jsem si vybral právě tento směr, protože i po necelém roce mě téma pořád baví a těším se na další práci s ním.

Druhý cíl byl vytvořit užitečný materiál pro kolegyně a kolegy se zájmem získat informace a dovednosti v podobném okruhu témat. Snažil jsem se psát vše tak jednoduše a jasně, jak jsem byl schopný. Předpokládaný čtenář je student bakalářského oboru astrofyzika a obsah je tomu přizpůsoben. Není dopodrobna vysvětlováno nic, co bylo obsahem základních kurzů studia. Spíš je připomenuto nebo rozvedeno to, co se podrobněji týká tématu. Zda tento cíl byl splněn, ukáže čas.

Cíl třetí byl porovnat vlastnosti slupek ve dvou principiálně odlišných potenciálech. Motivace nahrazení v minulosti nejčastěji používaného Plummerova potenciálu byla zejména jeho nesourodost s dnešní astrofyzikální představou o struktuře galaxií. Nahrazení kosmologicky motivovaným potenciálem NFW pro hala temné hmoty mělo za následek podstatnou změnu v úhlové charakteristice slupek. Tento rozdíl by měl být analyzovatelný a jeho pozorování či nepozorování by mělo mluvit ve prospěch jednoho z potenciálů. V odborné literatuře jsme bohužel nenašli práci, se kterou by šly naše výsledky porovnat.

Přílohy

V této sekci najdete programy, o kterých si myslím, že by mohly být užitečné při seznamování se s základy modelování galaktické dynamiky. Vybral jsem pouze ty klíčové, na které se odkazují v práci, a takové, jejichž vypracování není úplně elementární. V těle práce je popis programu a odkaz na soubor se zdrojovým kódem. Přišlo mi zbytečné tisknout něco, co stejně musíte vložit do počítače, aby to k něčemu bylo.

Základní programy jako, je vykreslení grafu, nepříkládám z pedagogického důvodu. Místo toho odkážu na internetové kurzy (tutorialy), kde Vás povedou od základů a vy se tak naučíte více, než kdybyste jen zkopírovali kód programu.

Numerické výpočty jsem programoval ve Fortranu. I přes stáří tohoto jazyka je pro tyto účely ideální. Jeho syntaxe mi přišla logická a rozdíl v rychlosti oproti Pythonu byl fatální. Pokud jste se s jazykem ještě nesetkali, můžu doporučit výukové video na [odkaze](#) [[θ](#)], kde vás autor provede instalací a ukáže vám základy. Pokračování pak najdete na [adrese](#) [[ι](#)]. I když je možné programovat ve Windowsech doporučuji pro programování přejít na nějakou distribuci Linuxu. Vyhnete se tak některým obtížně řešitelným problémům, které Vás pouze zdrží.

Výsledná data jsem vykresloval a vyhodnocoval pomocí jazyka Python. Pro tyto účely je velice užitečný a nabízí širokou škálu možností. Pokud jste s Pythonem ještě data nezpracovávali a nevykreslovali, můžu doporučit jeden seznam videí, který najdete na [odkaze](#) [[κ](#)], kde vás prvních pět návodů seznámí se základy. Další informace můžete čerpat z oficiálních stránek Pythonovské knihovny matplotlib na [adrese](#) [[λ](#)] nebo všeobecně z internetu. V dnešní době je uživatelů Pythonu mnoho, a proto když zadáte do vyhledávače slovní spojení popisující okruh vašeho zájmu, je velmi pravděpodobné, že najdete návod i s komentáři pokročilých programátorů.

I

Program pohybu částice v obou potenciálech

Na [adrese](#) [μ] najdete jednoduchý program napsaný ve Fortranu, který počítá dráhu částice se zadanou počáteční polohou a rychlostí ve dvou řešených potenciálech. Výstupem je datový soubor obsahující kartézské souřadnice v jednotlivých časových krocích pro částici v obou potenciálech.

Součástí programu je i kontrola zachování energie. Tato kontrola je velmi užitečným ověřením, zda program počítá korektně a nedochází například k přetečení datového typu.

II

Program na vytvoření animace z výstupu I.

Pokud se Vám líbily animace pohybu částic, tak na [adrese](#) [ν] naleznete soubor se zdrojovým kódem, který z výstupu programu I vytvoří animaci. Ta se pak může zobrazit nebo uložit do souboru.

III

Původní program pro simulace vzniku slupkových galaxií

Původní program simulace vzniku slupek najdete na [adrese](#) [ξ]. Základní princip programu je stejný jako v programu pro výpočet pohybu jedné částice I. Počáteční podmínky už však nezadááme přímo, ale jsou generovány na základě distribuční funkce Plummerovy sféry.

Výstupem programu jsou v původním nastavení obrázky slupek v různých časech. Program však není obtížné modifikovat tak, aby data zapsal do souboru.

Program pro spuštění potřebuje aby jeho cesta obsahovala dva přiložené soubory. Před spuštěním se také ujistěte, že máte nainstalovanou knihovnu PGPLOT, kterou program používá k vykreslení dat. Návod na instalaci knihovny PGPLOT najdete na [odkaze](#) [ϖ].

IV

Upravený program pro simulace vzniku slupkových galaxií v Plummerově potenciálu

Na [odkaze](#) [σ] je zdrojový kód programu, který byl použit pro simulaci vzniku slupek v Plummerově potenciálu. Stejně jako původní program [III](#) potřebuje pro spuštění mít v cestě dva příložené soubory a nainstalovanou knihovnu PGPLOT. Přiložil jsem i spustitelný soubor *output*, který spustí simulaci se stejnými parametry jako jsem použil v této práci.

Rozdíl mezi původním programem je zmenšený časový krok, zvýšený počet částic a modifikace pro zápis poloh částic do souboru.

Časový krok byl zmenšen z 0.5 My na 0.1 My z důvodu zpřesnění numerických výpočtů. Počet částic byl zvýšen ze 100 000 na 1 000 000 kvůli snížení šumu ve výsledných datech. Výpočetní čas programu se tak několikanásobně zvýšil. Simulace dlouhá 5 Gy trvá na průměrném notebooku okolo pěti hodin oproti asi třem minutám v původní verzi.

Pro datovou náročnost je do výstupního souboru zapisován každý stý krok výpočtu. Velikost výstupního souboru je pak necelých 35 GB. Pokud ale nechcete vytvářet animaci, tak stačí ukládat každý tisící krok. Program pro zpracování menšího výstupního souboru bude o něco jednodušší.

V

Upravený program pro simulace vzniku slupkových galaxií v NFW potenciálu

Soubor se zdrojovým kódem programu použitého pro simulaci vzniku slupek v NFW potenciálu naleznete na této [adrese](#) [τ]. Parametry výpočtu byly upraveny stejně jako ve verzi pro Plummerův potenciál. Následně byl nahrazen potenciál primární galaxie potenciálem popsáním v sekci [2.1.2](#).

Výpočetní čas je přibližně o polovinu delší než pro verzi s Plummerovým potenciálem. Je to způsobeno vyšší náročností výpočtu zrychlení v NFW potenciálu. Jinak je vše stejné jako v předchozím programu.

VI

Program na vykreslení jednotlivého snímku slupky

Pro zobrazení vzhledu slupek v jednotlivých časových krocích jsem vytvořil zdrojový kód, který najdete na této [adrese \[v\]](#). Jako vstup potřebuje program výstupní soubor z programu [IV](#) nebo [V](#).

Jelikož je vstupní datový soubor větší než operační paměť počítače většiny z nás, je potřeba ze souboru vybrat vždy jen používaný úsek. Zobrazení je pak provedeno pomocí dvourozměrného histogramu s logaritmickým škálováním. Metod zobrazení je ale samozřejmě více například jako v [animaci \[η\]](#).

VII

Program na vytvoření animace slupek

Poslední program, který přiložím, slouží k vytvoření animace z výstupu programu [IV](#) a [V](#). Zdrojový kód naleznete na [adrese \[χ\]](#).

Stejně jako při vykreslování jednotlivého snímku nelze celý vstupní soubor jednoduše načíst do paměti, ale je potřeba načíst jen jeho část, která se vejde do operační paměti a nechá dostatek volného místa pro jeho plynulý chod. Při vytváření animace není dobré načítat pouze data pro jeden snímek, protože by pak výpočetní čas byl zbytečně dlouhý. V originální verzi programu načítám vždy dvacet snímků, což na počítači s 8 GB RAM umožňuje bezproblémovou práci na pozadí. Počet snímků tedy doporučuji přizpůsobit velikosti operační paměti vašeho počítače.

Odkazy

- [Λ] <http://youtu.be/KjCZBQ11rXE>
- [β] http://youtu.be/_pRHsPfRt00
- [γ] <http://youtu.be/mq3KklTxjco>
- [δ] <http://youtu.be/X-j-BMRxx9g>
- [ϵ] <http://youtu.be/CgidmNNWzrE>
- [ζ] <http://youtu.be/Y2VxGk-fKeU>
- [η] <http://youtu.be/k2bskKX-zkc>
- [θ] <https://www.youtube.com/watch?v=OK6GSvpGZfk&list=PLWD3hzbGIx9DT1mycLgXlwDNGuCeFr-r2>
- [ι] <https://www.youtube.com/watch?v=gSJhfnhs598&list=PLow1pykD9NwIeDKcNxngoKYYqT7seZ2Dp&index=10>
- [κ] <https://www.youtube.com/playlist?list=PLQVvvaa0QuDfpEcGUM6ogsbrlWtqpS5-1>
- [λ] <http://matplotlib.org/index.html>
- [μ] http://physics.muni.cz/~glos/Baky/Prilohy/Priloha_I/
- [ν] http://physics.muni.cz/~glos/Baky/Prilohy/Priloha_II/
- [ξ] http://physics.muni.cz/~glos/Baky/Prilohy/Priloha_III/
- [ϖ] <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/Astrof/software/howto/howto-pgplot.html>
- [σ] http://physics.muni.cz/~glos/Baky/Prilohy/Priloha_IV/

- [τ] http://physics.muni.cz/~glos/Baky/Prilohy/Priloha_V/
- [υ] http://physics.muni.cz/~glos/Baky/Prilohy/Priloha_VI/
- [χ] http://physics.muni.cz/~glos/Baky/Prilohy/Priloha_VII/

Literatura

- [A] Binney J., Tremaine S., *Galactic dynamics*, Princeton University Press, 2008
- [B] Ebrova I., *Shell galaxies*, diplomova prace, MFF UK, 2007
- [C] Strobel N., *Astronomy Notes*, (<http://www.astronomynotes.com/>)
- [D] Barnes J. E., *Galaxies Astronomy 626*, Institute for astronomy, University of Hawaii, (http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/ast626_09/ast626.html)
- [E] Navarro, J. F.; Frenk, C. S.; White, S. D. M., *The Structure of Cold Dark Matter Halos*, 1996ApJ...462..563N, 05/1996, (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1996ApJ...462..563N>)

Elektronické zdroje

- [1] Max Planck Institute for Astrophysics, Credit: Volker Springel and the Max Planck Institute for Astrophysics. (<http://www.docstoc.com/docs/75686658/Summer-school-on-cosmological-numerical-simulations-3rd-week>)
- [2] Hubble Space Telescope, NASA, ESA, G. Miley and R. Overzier (Leiden Observatory), and the ACS Science Team, 2006 (<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/galaxy/2006/2006/45/>)
- [3] Hubble Space Telescope, NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) Acknowledgment: J. Blakeslee (Washington State University), 2008 (<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/galaxy/elliptical/2007/08/>)
- [4] Hubble Space Telescope, Credit: NASA, ESA, The Hubble Heritage Team, (STScI/AURA) and A. Riess (STScI), 2006 (<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/galaxy/spiral/2006/2006/07/>)
- [5] Hubble Space Telescope, Credit: NASA, ESA, A. Aloisi (STScI/ESA), and The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, 2007 (<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/galaxy/irregular/2007/2007/26/>)
- [6] Ken Crawford (Rancho Del Sol Observatory) (<http://www.imagingdeepsky.com/Galaxies/NGC7600/NGC7600.htm>)
- [7] Hubble Space Telescope, Credit: NASA, ESA, and G. Canalizo (University of California, Riverside) (<http://www.spacetelescope.org/images/ann0711/>)
- [8] Matthew T. Newby, Credit: Matthew T. Newby, Milkyway@home (<http://milkyway.cs.rpi.edu/milkyway/science.php>)

Created in L^AT_EX