

---

# НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА ГАЛАКСИИ

Наце Стојанов

## 1. ВОВЕД

Компјутерските симулации, гледано воопштено, се прават заради разбирањето на својствата на објектите или појавите за кои аналитичкиот приод не дава резултати, или едноставно речено не може да се примени. Ако се земат во предвид проблемите кои денес се истражуваат во науката и технологијата или инженерството, може лесно да се заклучи дека бројот на аналитички разрешливи проблеми е речиси безначаен, па затоа како единствена сигурна опција остануваат компјутерските симулации. Треба да се има предвид, дека компјутерските симулации се еден вид дополнување на конвенционалните експерименти, што ни овозможуваат да научиме нешто ново кога тоа не може да се најде со други начини.

Како примери на проблеми кои се разрешени или се разрешуваат и денес единствено со компјутерски симулации се: енергетските спектри на атомите и молекулите, развојот на суперструктури кои овозможиле добивање на дигитални интегрирани кола, а со тоа и на денешните компјутери, моделирањето на климатските промени или динамиката на океаните како и разбирањето на постанокот и еволуцијата на галаксиите.

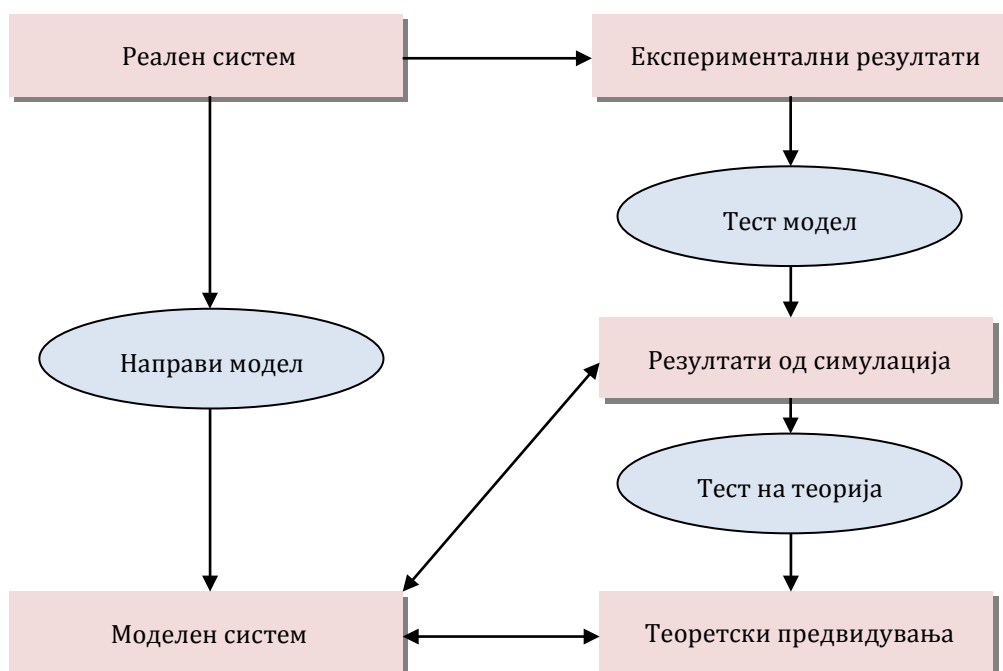
Компјутерските симулации дејствуваат како мост (види слика 1) помеѓу микроскопските карактеристики на предметите и појавите и макроскопскиот свет на лабораторијата. На пример, врз основа на претпоставената интеракција помеѓу атомите на еден систем, може да се добијат „точни“ информации за макроскопските својства на системот. Притоа, се покажува дека точноста на нумеричките информации најчесто зависи од ограничувањата на буџетот што можеме да си го дозволиме за нашиот компјутер!

Компјутерските симулации може да дејствува и како мост помеѓу теоријата и експеримент. Ние може да ја тестираме теоријата со споредување на резултатите што се добиени со симулација во која се користи истиот модел, исто како што може го тестираме моделот со споредување на резултати добиени експериментално. Но можеби најважната предност на компјутерските симулации е проверката на теоријата во екстремни услови, на пример високи температури, притисоци или гравитација што не може да се обезбедат во лабораторија.

Исто така, во определени ситуации може да се бара директно споредување на експерименталните резултати со предвидувањата на теориските модели, за што е неопходно извонредно точно моделирање на интеракцијата помеѓу структурните

честици. Во тие случаи се користи т.н. *ab-initio* молекуларна динамика која има улога да ги сведи на минимум сите „нагаѓања“ во моделот.

Од друга страна има случаи кога не интересира некој феномен кој има општа природа, или пак сакаме да дознаеме дали некоја теорија е добра или лоша. Во тие случаи не е неопходно да се има перфектно добар модел, туку само модел во кој се опишуваат основните физички законитости.



Сл. 1. Поврзаноста на компјутерските симулации со експериментот и теоријата.

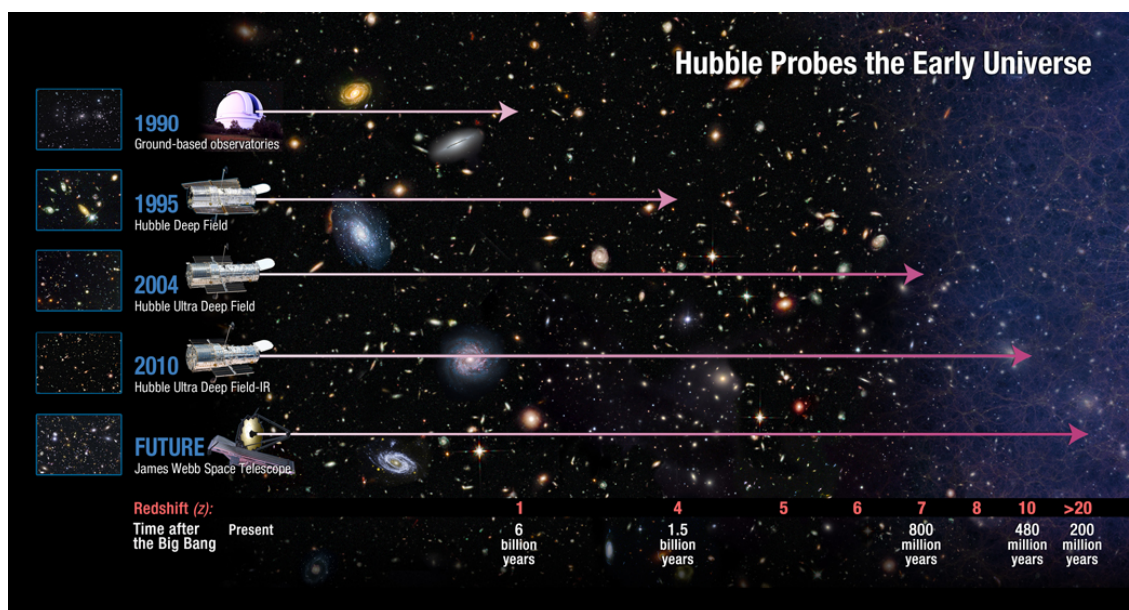
Во овој текст ќе се осврнеме на компјутерските симулации на галаксиите. За нив се развиени две главни семејства на техники за симулација а тоа се: **молекуларната динамика** и **Монте Карло**. Покрај нив, постои и цела низа на хибридни техники во кои се комбинираат карактеристики од овие две семејства.

## 2. ЗА ГАЛАКСИИТЕ

Најпрво да видиме какви објекти се галаксиите и што знаеме за нив. Пред развојот на суперкомпјутерите, фактите за галаксиите се добивале исклучиво преку астрономски мерења, така да не е тешко да се претпостави дека на тој начин можело да се одговорат само ограничен број на непознати работи.

На пример, едно од фундаменталните прашање е од каде потекнуваат галаксиите? Астрономските набљудувања покажале дека првите ѕвезди настанале околу 200 милиони години после големата експлозија, за да потоа, најверојатно како резултат и на гравитационото привлекување се формирале многу поголеми формации на ѕвезди наречени галаскии. Кога станува збор за видливиот регион на спектарот, Хабловиот телескоп ни дава најдобри резултати затоа што може да

„гледа“ до помалку од 1 милијарда години после големата експлозија. Моќностите на телескопите што ни се денес на располагање или се планираат, компаративно се прикажани на слика 2.



Сл. 2. Сликвит приказ на можностите на Хабловиот телескоп за фотографирање на далечни објекти.

Доколку сакаме да продриме подлабоко и да ги „видиме“ моментите на формирање на галаксиите, ќе ни треба многу поголем телескоп во вселената, како што е проектот за James Webb Space Telescope (JWST). Се планира овој гигантски телескоп да биде значително поголем од Хабловиот и да има огледало со дијаметар од 6,5 m. Ќе се карактеризира со онструменти кои ќе бидат прилагодени за набљудувања во различни области на инфрацрвената светлина. Но сепак, колку и да звучи добро овој проект и многу скап и ќе треба да почека подобри времиња за негова реализација.

Мометалното решение, пред се заради економски причини, е примена на нова технологија со телескоп на Земјата. Затоа, на северот на Чиле, во пустината Атакама веќе е изграден телескопот Atacama Cosmology Telescope (ACT), (види слика 3) и тоа на надморска висина од 5190 m што само по себе е рекордна висина на која е поставен некој телескоп на Земјата. Овој телескоп е наменет за набљудување на космичкото микрибраново зрачење (CMB) и тоа со најголема можна резолуција денес. Со ова, телескопот ACT може да гледа до неколку стотини илјади години после големата експлозија, што го опфаќа и предпоставениот период за постанокот на галаксиите. Покрај ова, ќе може да се набљудуваат и моментите од развојот на галаксиите.

Ова значи дека ACT може да обезбеди докази за тоа како изгледале галаксиите во нивните рани години и секако како тие се развивале потоа. Набљудувањата покажале дека првичните галаксии немале форма туку биле збир од расфрлани ѕвезди, гасни облаци и космичка прашина. Но затоа денес галаксиите

се пример за ред во вселената затоа што најчесто имаат правилна форма во вид на елипсоид или повеќекраки спирали. Затоа со право се поставува прашањето како од несредени објекти се формирале галаксиите какви што денес го знаеме? Одговорот се смета дека е едноставен а тоа е гравитацијата која е одговорна не само за нивното формирање туку го дефинира и нивниот развој односно судбина.



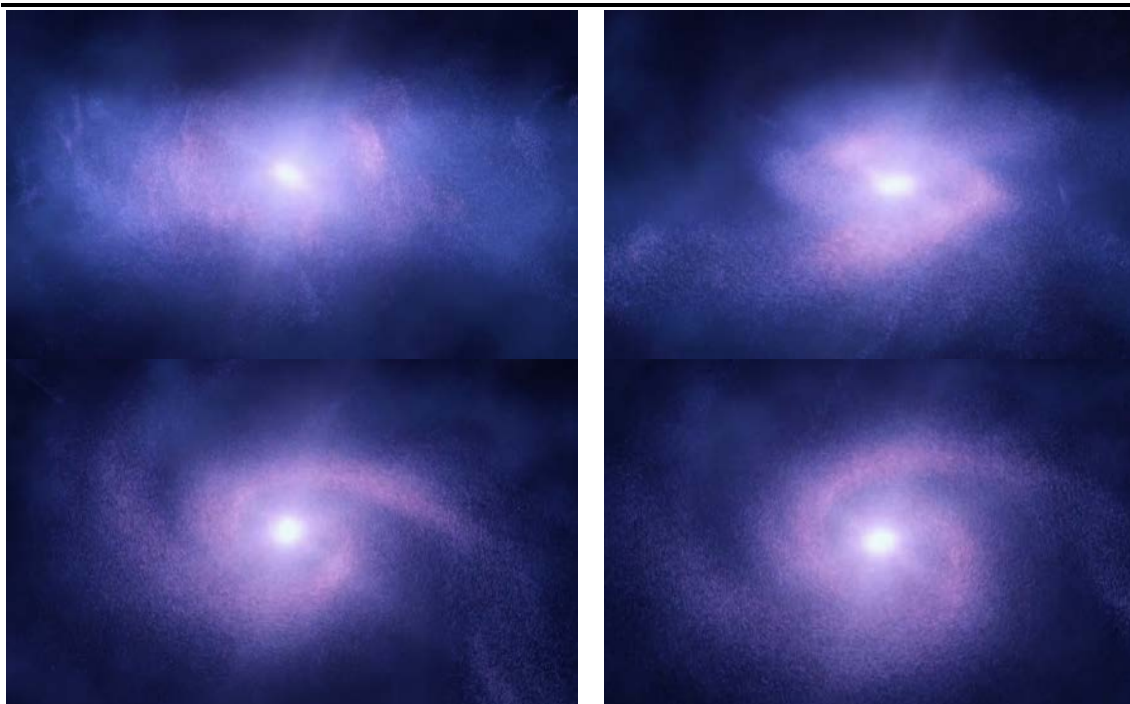
Сл. 3. Atacama Cosmology Telescope (ACT).

А од каде потекнува гравитацијата на галаксиите? Веднаш би одговориле дека за тоа е одговорна масата на ѕвездите, но истражувањата покажале дека овој одговор не е баш најточен затоа што гравитацијата во најголем дел потекнува од галактичките супер масивни црни јами што се наоѓаат во центарот на секоја галаксија.

Но, секако дека има и прашања што не можеме да ги одговориме иако на располагање ни се Хабловиот телеском и ACT. На пример, зошто постојат два вида на галаксии, или дали спиралните галаксии се такви од моментот на нивното формирање или се видоизменуваат со тек на времето?

Одговор на ова и слични прашања може да ни дадат само компјутерските симулации засновани на нумерички модели. Врз основа на добиените резултати од компјутерските симулации се покажало дека галаксиите во почетокот навистина биле хаотични објекти кои потоа преминуваат во средени па и организирани структури. На пример, нашата галаксија млечен пат, како и други слични на неа, во почетокот биле создадени од расфрлани групации на ѕвезди, види слика 4а, кои биле расфрлани во просторот. Потоа, заради својствата на гравитацијата како и движењата во централно-симетрични полња, распределбата на ѕвездите преминува во речиси рамнинска при што најпрво се формира галактичкото јадро, слика 4б а потоа и краците на галаксиите, слика 4в и 4г.

Симулациите за вака сложени структури се изведуваат исклучиво на суперкомпјутери. Накратко, тоа се компјутерски конфигурации што може да зафатат простор на едно кошаркарско игралиште или повеќе, и во себе содржат повеќе илјади процесорски јадра, што им овозможува да бидата побрзи и до  $10^5$  пати од најбрзиот денешен десктоп компјутер заснован на повеќејадрени i7 процесори.



Сл. 4. Фази од развојот на спиралните галаксии.

### 3. НУМЕРИЧКИ МОДЕЛИ

Кога зборуваме за нумеричкото моделирање на галаксиите, во основа тоа е нумеричко (приближно) решавање на системи од диференцијални равенки со кои се опишува движењето на честиците (свездите) во еден динамички систем како што е галаксијата под дејство на гравитација. За да симулацијата биде реална, потребно е предвид да се земат што поголем број на честици (свезди), на пример еден милион или  $n=10^6$ , и за нив да се направи симулација која предвид ќе земи реалистични физички законитости за заемодејство меѓу свездите. Јасно е дека вака сложен и обемен проблем не може ни да започни да се решава аналитички, туку само со помош на суперкомпјутер.

Да видиме како започнува правењето на виртуелната реалност за галаксиите. Бидејќи зборуваме за  $n$ -честично гравитационо заемодејство, во принцип е можно истовремено заемодејство помеѓу две, три или пак сите тела, но се разбира дека веројатноста за реализација не е подеднаква. Истражувањата покажале дека најчесто треба да се земи предвид истовремено гравитационо заемодејство помеѓу две или три тела (свезди), со што може да напишеме

$$\vec{f}_g = \vec{f}_{ij} + \vec{f}_{ijk} + \dots \quad (1)$$

Од тука, општата равенка за парното гравитационо заемодејство ќе гласи

$$\vec{f}_{ij}(\vec{r}_{ij}) = -\gamma \frac{m_i m_j}{r_{ij}^2} \vec{r}_{ij}, \quad (2)$$

каде што  $r_{ij}$  е растојание помеѓу  $i$ -та и  $j$ -та честица што се дефинира со

$$\vec{r}_{ij} = (x_i - x_j)\vec{i} + (y_i - y_j)\vec{j} + (z_i - z_j)\vec{k}, \quad (3)$$

$\gamma$  е гравитационата константа а  $m_i$  и  $m_j$  се масите на звездите (телата) што заемдејствуваат. Ако се земе предвид сумарното заемдејство на сите  $n-1$  тела врз едно тело, ќе имаме

$$\vec{F}_i = -\gamma m_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{m_j}{r_{ij}^2} \vec{r}_{ij}, \quad (4)$$

Ако ја земиме предвид равенката (4) во 3 димензии, ќе имаме систем од 6*n* диференцијални равенки кој може да се реши само со нумерички методи како што се оние на Верлет или Рунге-Кутта. Кога зборуваме за нумеричките алгоритми (методи) еве накратко за што станува збор.

Од Вториот закон на Њутн имаме  $\vec{F} = m \vec{a}$  или во диференцна форма

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad (5)$$

што може да се запише и како

$$\Delta \vec{v}_i = \vec{v}_i^{n+1} - \vec{v}_i^n = \frac{\vec{F}_i}{m} \Delta t, \quad (6)$$

од каде следи дека прирастот на брзината со времето, во наједноставна форма, е зададен како

$$\vec{v}_i^{n+1} = \vec{v}_i^n + \frac{\vec{F}_i}{m} \Delta t, \quad (7)$$

додека за прирастот на поместувањето имаме

$$\vec{r}_{ij}^{n+1} = \vec{r}_{ij}^n + \vec{v}_i^{n+1} \Delta t. \quad (8)$$

Значи, улогата на нумеричките модели е да наместо аналитичко решавање на ситем од равенки (4) имаме приближно решавање на систем од равенки (7 и 8).

Накратко кажано, нумеричките модели овозможиле разрешување на многу проблеми кои на почетокот биле речиси нерешливи од проста причина што аналитичкиот пристап има големи ограничувања и е применлив само на мал број реални системи. Целокупниот научен и технолошки развој денес е резултат речиси исклучиво на примената на нумеричките модели и компјутерските симулации, па затоа за идните млади истражувачи оваа дисциплина треба да биде предизвик.