

УДК 415.18

АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ КВАНТОВИХ ФЛУКТУАЦІЙ У ТРИВИМІРНИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТАХ ДЛЯ КОСМОЛОГІЧНИХ СИМУЛЯЦІЙ

Ванін В.В., д-р. техн. наук,

vaninvladimir30@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7008-7269

Залевська О.В., канд. техн. наук,

o.zalevska@kpi.ua, ORCID: 0000-0002-3163-169

Гусева І.І., канд. техн. наук,

i.husyeva@kpi.ua, ORCID: 0000-0002-8762-3918

Ляшко І.І.,

igor.lyashko.01@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4003-8332

Дацюк О.А.,

doka70@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1337-133X

Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського (м. Київ, Україна)

Дзюбич І.С.

igor.dzyubich@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2204-9480

«EPAM Systems» (м. Київ, Україна)

У представленій науковій роботі розглядається алгоритмічна реалізація моделювання квантових флуктуацій у тривимірних клітинних автоматах (3D КА) з метою їх застосування в космологічних симуляціях еволюції Всесвіту. Клітинні автомати за своєю природою є масово паралельними системами, оскільки всі комірки оновлюються одночасно (або, принаймні, незалежно в рамках одного часового кроку). Це робить їх ефективними для моделювання систем з великою кількістю взаємодіючих елементів. Тобто еволюція клітинних автоматів розглядається як процес обчислення. З цієї точки зору, Всесвіт сам може бути величезною обчислювальною системою, а його історія – результатом виконання певної фундаментальної програми або алгоритму. Ця ідея лежить в основі парадигми цифрової фізики. Наше дослідження зосереджено на теоретичному обґрунтуванні явища квантових флуктуацій, їх фундаментальній ролі у формуванні великомасштабної структури Всесвіту як первинних збурень, що ініціюють гравітаційний колапс матерії. Детально описано методологію імплементації стохастичного механізму генерації флуктуацій у дискретній просторово-часовій парадигмі 3D КА. Розглянуто визначення станів клітин, що характеризуються інтенсивностями космологічних компонент (матерії-енергії, темної матерії, темної енергії), а також станом "Void" (порожнеча). Представлено алгоритмічні кроки генерації випадкових збурень, що моделюють квантові флуктуації, та їх вплив на локальні

інтенсивності зазначених компонент. Особливу увагу приділено інтеграції розробленого алгоритму в ширшу систему моделювання, що включає алгоритми гравітаційної взаємодії, розширення простору під дією темної енергії та дифузійних процесів. Розглядається роль стохастичного алгоритму у порушенні симетрії, генерації первинних "зародків" неоднорідностей та підвищенні реалізму космологічної моделі. Запропонований підхід до побудови математичної моделі з використанням клітинних автоматів є спрощеною моделлю створення Всесвіту, а вибір параметрів флуктуацій потребує подальшого дослідження, аналізу, уточнення та калібрації.

Ключові слова: клітинний автомат, тривимірне моделювання, квантові флуктуації, еволюція Всесвіту, космологічні симуляції, алгоритм, стохастичні процеси, структура.

Постановка проблеми. Незважаючи на потенціал 3D КА, їх застосування в космології обмежене порівняно з 1D та 2D аналогами [source: 44]. Існує потреба в розробці спеціалізованих програмних інструментів, які б дозволяли дослідникам ефективно використовувати 3D КА для моделювання космологічних сценаріїв (наприклад, фаз після Великого вибуху), не вимагаючи при цьому глибоких знань у програмуванні [1]. Відсутність доступних та гнучких програмних рішень стримує ширше впровадження цього підходу в наукові дослідження.

Модель Всесвіту часто містять різні гіпотези та нелінійні параметри, які потрібно враховувати в дослідженнях. Тому виникає необхідність в розробці інструменту, який дозволяє користувачам (науковцям) легко визначати та модифікувати власні правила динаміки системи (правила оновлення станів клітин), що відповідають різним теоретичним моделям або сценаріям еволюції

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концептуальна привабливість застосування КА до космології полягає в гіпотетичній можливості виведення спостережуваної складності Всесвіту, включно зі структурою простору-часу та фізичними законами, з дуже простих, фундаментальних, дискретних правил [1]. Цей підхід резонує з ширшою парадигмою "цифрової фізики" або "It from Bit", яка припускає, що інформація та обчислення можуть бути більш фундаментальними, ніж матерія та енергія [2]. Моделі на основі КА можуть запропонувати вирішення давніх проблем стандартної космології, таких як проблема сингулярності на початку Великого Вибуху [3], оскільки дискретна природа КА за визначенням уникає нескінченностей, характерних для континуальних теорій [4]. Крім того, КА можуть надати природний спосіб введення фундаментальної довжини (наприклад, планківської довжини) та дослідження природи простору-часу на найменших масштабах, що є однією з центральних задач квантової гравітації [5]. Характеристикою КА є дискретність простору, часу та станів комірок [6]. На відміну від

класичної фізики, яка оперує неперервними змінними та диференціальними рівняннями на гладкому просторово-часовому континуумі, КА засновані на скінченних або злічених наборах елементів та дискретних кроках еволюції [7]. Ця вбудована дискретність має важливі наслідки для космології. Зокрема, вона природним чином вводить фундаментальний масштаб (наприклад, планківську довжину), нижче якого поняття неперервного простору-часу втрачає сенс [8]. Це потенційно дозволяє уникнути сингулярностей, таких як початкова сингулярність Великого Вибуху або сингулярності всередині чорних дір, які є артефактами континуальних теорій, де фізичні величини можуть ставати нескінченними [9]. Усунення сингулярностей є однією з ключових мотивацій для пошуку теорії квантової гравітації, і КА пропонують один з можливих шляхів вирішення цієї проблеми.

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є розробка алгоритму для реалізації моделювання квантових флуктуацій у тривимірних клітинних автоматах для космологічних симуляцій. Такий алгоритм має надавати можливості для візуалізації та аналізу еволюції 3D КА в реальному часі [10], мати спеціалізований інтерфейс управління параметрами моделі та забезпечувати формулювання власних правил еволюції клітинного автомату. Для досягнення поставленої мети було визначено наступні цілі:

- Дослідити існуючі методи та підходи до моделювання еволюції Всесвіту, зокрема з використанням клітинних автоматів та проаналізувати сучасні алгоритми моделювання релевантних космічних процесів (гравітація, розширення, квантові флуктуації тощо):

- Обрати відповідні засоби розробки (мову програмування Java, середовище IntelliJ IDEA, бібліотеки JOML, LWJGL, ANTLR4) та розробити спеціалізовану домен-специфічну мову програмування (CellLang) на базі ANTLR4 для інтуїтивного визначення правил користувачем.

- Спроекувати та реалізувати алгоритм та програмне забезпечення, що підтримує моделювання та візуалізацію 3D КА.

- Розробити алгоритми для управління станами клітин, їх ініціалізації та динамічного оновлення відповідно до заданих правил та фізичних моделей (гравітація, темна енергія, флуктуації, дифузія, збереження енергії).

- Провести тестування програмного забезпечення на стабільність, ефективність та точність.

- Протестувати та валідувати систему на основі сценаріїв моделювання, таких як "Великий вибух", порівнюючи результати з теоретичними очікуваннями.

Ключовим елементом таких симуляцій є адекватне відтворення стохастичних процесів, зокрема квантових флуктуацій. У цій статті детально розглядається алгоритмічна реалізація моделювання квантових

флуктуацій у рамках 3D КА, розроблена як частина програмного комплексу для симуляції еволюції Всесвіту [10]. Метою є опис методології, її обґрунтування та обговорення її ролі в загальній динаміці моделі.

Основна частина. Згідно з квантовою теорією поля, вакуум не є абсолютно порожнім, а характеризується постійними флуктуаціями квантових полів, що призводять до тимчасових змін енергії в кожній точці простору. Це явище впливає з принципу невизначеності Гейзенберга для енергії та часу ($\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$) [10]. У контексті інфляційної космології, ці мікроскопічні квантові флуктуації розтягуються до астрономічних масштабів під час експоненційного розширення Всесвіту, перетворюючись на класичні збурення густини та метрики простору-часу. Саме ці збурення вважаються первинними "зародками" для гравітаційного колапсу матерії та подальшого формування великомасштабної структури.

У запропонованій моделі використовується тривимірна кубічна сітка. Стан кожної клітини характеризується інтенсивностями (рівнем насиченості) кількох космологічних компонент: матерії-енергії (звичайна баріонна матерія та енергія), темної матерії та темної енергії. Також існує стан "Void" (порожнеча), що відповідає нульовим інтенсивностям усіх компонент. Вибір цих станів та їхні відносні пропорції обґрунтовані сучасними космологічними даними. Взаємодії між клітинами (гравітація, розширення, дифузія) визначаються локальними правилами, що застосовуються синхронно до всіх клітин сітки.

Алгоритм симуляції квантових флуктуацій у 3D КА

Алгоритм реалізується наступними кроками для кожної клітини (x,y,z) сітки на кожному часовому кроці t:

1. Визначається базовий параметр – ймовірність P_{fluct} виникнення квантової флуктуації в одній клітині за один часовий крок. У представленій роботі, через відсутність точних даних для калібрації, використовується мале значення (напр., 10^{-8} або 0.000001%), яке дозволяє спостерігати ефект флуктуацій у розумний час симуляції, але підкреслюється, що цей параметр є конфігурованим. Також визначається максимальна амплітуда зміни інтенсивності $maxFluctuation$
2. **Стохастична перевірка:** Генерується випадкове число $R_{check} \in [0,1]$. Якщо $R_{check} < P_{fluct}$, вважається, що в даній клітині відбувається квантова флуктуація
3. **Модифікація стану клітини:** Якщо флуктуація відбулася, випадковим чином обирається тип компоненти (матерія-енергія, темна матерія або темна енергія), інтенсивність якої буде змінено. Генерується друге випадкове число $R_{amp} \in [-1,1]$. Зміна інтенсивності ΔI обчислюється за формулою $\Delta I = R_{amp} \times maxFluctuation$ а інтенсивність I_{new} стає $I_{current} + \Delta I$. Це може призвести до появи невеликої кількості матерії/енергії у "порожній" клітині або до зміни існуючих інтенсивностей

4. **Забезпечення стабільності (Корекція меж):** Після модифікації перевіряється, чи нова інтенсивність I_{new} залишається в межах допустимих фізичних (або модельних) значень (наприклад, $I_{new} \geq 0$ та $I_{new} \leq I_{max}$, де I_{max} – максимально можлива інтенсивність у моделі). Якщо значення виходить за межі, воно коригується до найближчого допустимого значення (наприклад, $\max(0, \min(I_{new}, I_{max}))$). Цей крок є важливим для запобігання нефізичним станам та чисельній нестабільності моделі.

Алгоритм квантових флуктуацій виконується поряд з іншими алгоритмами, що визначають еволюцію системи, такими як алгоритм гравітаційного тяжіння (обчислення сил між клітинами на основі їхніх "мас" – інтенсивностей матерії та темної матерії). Алгоритм розширення темної енергії (моделювання відштовхування, пропорційного інтенсивності темної енергії), та правила дифузії (перерозподіл інтенсивностей для згладжування градієнтів) дотриманням загального принципу збереження енергії (з відповідними корекціями, якщо необхідно).

Представлений алгоритм моделювання квантових флуктуацій відіграє ключову роль у динаміці симуляції еволюції Всесвіту на базі 3D КА. Його основний внесок полягає у введенні стохастичності в систему, яка без цього могла б еволюціонувати занадто детерміновано та однорідно, особливо при старті з високосиметричних початкових умов (наприклад, одна центральна клітина з високою енергією, що симулює стан після Великого вибуху).

Квантові флуктуації, реалізовані цим алгоритмом, виконують кілька важливих функцій - вони руйнують ідеальну симетрію початкового стану або однорідного розширення, створюючи локальні неоднорідності. Ці випадково виникаючі неоднорідності густини (зміни інтенсивностей) слугують первинними "зародками", які потім можуть посилюватися під дією гравітаційної нестабільності (моделюваної алгоритмом гравітації), ведучи до формування складніших структур. Введення стохастичного елемента наближає модель до фізичної реальності раннього Всесвіту, де квантові ефекти були суттєвими.

Висновки. У роботі представлено алгоритм для моделювання квантових флуктуацій у рамках тривимірних клітинних автоматів, призначений для використання в космологічних симуляціях. Алгоритм базується на стохастичному введенні локальних змін до інтенсивностей матерії-енергії, темної матерії та темної енергії в клітинах сітки з певною ймовірністю. Показано, що цей механізм відіграє важливу роль у порушенні симетрії, генерації первинних неоднорідностей та формуванні складних структур у моделі, що якісно відповідає сучасним уявленням про роль квантових флуктуацій в еволюції раннього Всесвіту.

Реалізація цього алгоритму як частини інтегрованого програмного комплексу, що також враховує гравітацію, темну енергію та дифузцію,

демонструє потенціал 3D КА як інструменту для дослідження складних космологічних явищ. Подальший розвиток може включати уточнення фізичної моделі флуктуацій, калібрацію параметрів та порівняння результатів симуляцій з астрономічними спостереженнями.

Література

1. Вайнберг С. Квантова теорія поля. Кембридж: Cambridge University Press, 1995.
2. Гут А. Інфляційний Всесвіт: можливе вирішення проблем горизонту та плоскості. *Physical Review D*. 1981. Vol. 23, No. 2. pp. 347–356. DOI: 10.1103/PhysRevD.23.347
3. Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*. 2020. Vol. 641. A6. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910
4. Smith A., Zhang B. Comparative study of computational complexity in cellular automata. *Journal of Computational Science*. 2022. Vol. 58. Article 101529. DOI: 10.1016/j.jocs.2021.101529
5. Hansen G., Smith L. Comparative analysis of diffusion models using cellular automata and finite difference methods. *Journal of Computational Physics*. 2018. Vol. 371. pp. 425–438. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.06.024
6. Залевська О., Фіногенов О., Ібнухсейн І., Суворова В. Використання онлайн-технологій для побудови тривимірних клітинних автоматів. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 22. С. 39–47. Режим доступу: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/2942>
7. Zalevska O. et al. Construction and study of the mathematical model for the system using three-dimensional cellular automata. *Proc. 2021 IEEE 16th Int. Conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*. 2021. С. 1–4. DOI: 10.1109/CADSM52681.2021.9386250
8. Vanin V., Zalevska O., Sydorenko I., Gong X., Kovalchuk O. Algorithms of neural networks for the construction of cellular automata. *Modern Problems of Modeling*. 2023. No. 24. С. 28–36. DOI: 10.33842/2313-125X-2022.24.39.4
9. Planck Collaboration. Planck 2018 results. *Astronomy & Astrophysics*. 2020. Vol. 641. Частина A1–A29. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910
10. Ganguly N., Sikdar B. K., Deutsch A., Canright G., Chaudhuri P. P. A survey on cellular automata. Dresden: Centre for High Performance Computing, 2003. (Technical Report). Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/nlin/0303023>

ALGORITHMIC IMPLEMENTATION OF QUANTUM FLUCTUATIONS MODELING IN THREE-DIMENSIONAL CELLULAR AUTOMATA FOR COSMOLOGICAL SIMULATIONS

Volodymyr Vanin, Olha Zalevska, Iryna Husyeva, Igor Leasko,
Oksana Datsyuk, Igor Dzyubich

This scientific work examines the algorithmic implementation of quantum fluctuations modeling in three-dimensional cellular automata (3D CA) for their application in cosmological simulations of Universe evolution. Cellular automata are inherently massively parallel systems, as all cells update simultaneously (or at least independently within a single time step). This makes them effective for modeling systems with a large number of interacting elements. Thus, the evolution of cellular automata is viewed as a computational process. From this perspective, the Universe itself can be considered a vast computational system, and its history - the result of executing certain fundamental program or algorithm. This idea underlies the paradigm of digital physics. Our research focuses on the theoretical foundation of quantum fluctuations phenomenon, their fundamental role in forming the large-scale structure of the Universe as primary perturbations that initiate gravitational collapse of matter. The methodology for implementing the stochastic mechanism of fluctuation generation in the discrete space-time paradigm of 3D CA is described in detail. The definition of cell states characterized by intensities of cosmological components (matter-energy, dark matter, dark energy), as well as the "Void" state is considered. Algorithmic steps for generating random perturbations that model quantum fluctuations and their impact on local intensities of these components are presented. Special attention is paid to integrating the developed algorithm into a broader modeling system that includes algorithms for gravitational interaction, space expansion under dark energy influence, and diffusion processes. The role of the stochastic algorithm in breaking symmetry, generating primary "seeds" of inhomogeneities, and increasing the realism of the cosmological model is examined. The proposed approach to constructing a mathematical model using cellular automata is a simplified model of Universe creation, and the selection of fluctuation parameters requires further research, analysis, refinement, and calibration.

Keywords: cellular automaton, three-dimensional modeling, quantum fluctuations, evolution of the Universe, cosmological simulations, algorithm, stochastic processes, structure.

References

1. Weinberg, S.(1995). *The Quantum Theory of Fields*. Cambridge University Press, 1995. [in Ukrainian]

2. Guth, A. H. (1981). Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D*. 23(2). 347–356. DOI: 10.1103/PhysRevD.23.347 [in Ukrainian]
3. Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. (2020). *Astronomy & Astrophysics*. Vol. 641. A6. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910
4. Smith A., Zhang B. (2022). Comparative study of computational complexity in cellular automata. *Journal of Computational Science*. Vol. 58. Article 101529. DOI: 10.1016/j.jocs.2021.101529
5. Hansen G., Smith L. (2018). Comparative analysis of diffusion models using cellular automata and finite difference methods. *Journal of Computational Physics*. Vol. 371. Pp. 425–438. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.06.024
6. Zalevska O., Finogenov O., Ibnukhsein I., Suvorova V. (2022). Using online technologies to build three-dimensional cellular automata. *Suchasni problemy modeliuвання*. 22. 39–47. Retrieved from: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/2942> [in Ukrainian]
7. Zalevska O. et al. (2021). Construction and study of the mathematical model for the system using three-dimensional cellular automata. *Proc. 2021 IEEE 16th Int. Conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*. 1–4. DOI: 10.1109/CADSM52681.2021.9386250
8. Vanin V., Zalevska O., Sydorenko I., Gong X., Kovalchuk O. (2023). Algorithms of neural networks for the construction of cellular automata. *Modern Problems of Modeling*. 24. 28–36. DOI: 10.33842/2313-125X-2022.24.39.4
9. Planck Collaboration. Planck 2018 results. 2020. *Astronomy & Astrophysics*. Vol. 641. Parts A1–A29. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910
10. Ganguly N., Sikdar B. K., Deutsch A., Canright G., Chaudhuri P. P. (2003). A survey on cellular automata. Dresden: Centre for High Performance Computing, (Technical Report). Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/nlin/0303023>