

УДК 004.942:519.6:523.9

## МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ВСЕСВІТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТРИВИМІРНИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

Ванін В.В., д-р техн. наук,

[vaninvladimir30@gmail.com](mailto:vaninvladimir30@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7008-7269

Залевська О.В., канд. техн. наук,

[o.zalevska@kpi.ua](mailto:o.zalevska@kpi.ua), ORCID: 0000-0002-3163-169

Гусева І.І., канд. техн. наук,

[i.husyeva@kpi.ua](mailto:i.husyeva@kpi.ua), ORCID: 0000-0002-8762-3918

Ляшко І.І.,

[igor.lyashko.01@gmail.com](mailto:igor.lyashko.01@gmail.com), ORCID: 0000-0002-4003-8332

Дацюк О.А.,

[doka70@ukr.net](mailto:doka70@ukr.net), ORCID: 0000-0003-1337-133X

Савицький К.О.,

[kirillsavitsky56@gmail.com](mailto:kirillsavitsky56@gmail.com), ORCID 0009-0008-7608-0760

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

*У статті розглянуто застосування тривимірних клітинних автоматів (3D КА) як інноваційного інструменту для моделювання формування та еволюції геометричної структури Всесвіту (ВКС). Проаналізовано фундаментальні принципи, що лежать в основі клітинних автоматів, та можуть забезпечувати вплив на геометрію моделювання. Особливу увагу приділено концептуальному зв'язку між клітинними автоматами та парадигмою "Цифрової Фізики", яка передбачає, що Всесвіт на фундаментальному рівні може бути описаний як обчислювальна система.*

*Розглянуто конкретні приклади моделей 3D КА, що застосовуються для моделювання космологічних процесів, зокрема 3D Геометричний КА Фредкіна/EMQG та КА Модель Адгезії. Детально описано їхні правила оновлення стану клітинок, типи комірок та можливі стани, а також способи, якими ці моделі намагаються імітувати фізичні процеси, такі як гравітація та формування космічних структур. Проведено оцінку успішності відтворення спостережуваних характеристик ВКС за допомогою 3D КА та здійснено порівняльний аналіз з результатами стандартних N-body симуляцій, що базуються на моделі  $\Lambda$ CDM.*

*Доцільність використання КА для моделювання структури Всесвіту ґрунтується на моделях їх побудови, які пропонують використовувати дискретизацію простору та часу, що суттєво для квантової гравітації. Також, їхній внутрішній паралелізм добре підходить для моделювання великих структур, а здатність генерувати складні об'єкти на основі простих правил дає можливість пояснити формування структури*

*Всесвіту використовуючи відносно прості початкові умови. Головна ідея моделювання структури за допомогою КА є поняття емерджентного простору-часу та фізичних законів, що виникають із базових обчислювальних правил. Таким чином, дослідження структури Всесвіту з використанням КА може розглядатись як альтернативний підхід до зміни його форм. В роботі описано алгоритм який визначає правила зміни стану клітини та визначено ключові переваги та недоліки традиційного та наведеного підходів до моделювання. Розглянуто обчислювальні та теоретичні проблеми пов'язані з проблеми узгодження з спостереженнями та розробки ефективних алгоритмів.*

*Ключові слова: клітинні автомати, 3D КА, великомасштабна структура Всесвіту, космологічне моделювання, цифрова фізика, N-body симуляції,  $\Lambda$ CDM.*

**Постановка проблеми** Сучасна космологія досягла значних успіхів у моделюванні структури Всесвіту за допомогою N-body симуляцій у рамках моделі  $\Lambda$ CDM. Однак, існують фундаментальні питання щодо природи простору-часу та фізичних законів на найглибшому рівні. Паралельно з цим, виникає питання про можливість альтернативних підходів до моделювання, які могли б запропонувати нові погляди на ці проблеми. Зокрема, виникає питання: чи можна ефективно використовувати тривимірні клітинні автомати (3D КА) для моделювання формування та еволюції ВКС, та визначення правил переходу між станами системи. та порівняння цього підходу зі стандартними N-body симуляціями.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Традиційні N-body симуляції, що базуються на моделі  $\Lambda$ CDM (Lambda Cold Dark Matter), є основним інструментом у сучасних дослідженнях для моделювання формування та еволюції структури Всесвіту [1]. Ці симуляції розглядають Всесвіт як набір частинок, що взаємодіють гравітаційно, і відстежують їх рух та розподіл з часом [2]. До переваг такого підходу можна віднести високу точність відтворення спостережуваних характеристик ВКС, таких як розподіл галактик, космічні нитки та скупчення, добре розвинену методологію та програмне забезпечення, можливість моделювання широкого спектру фізичних процесів, включаючи темну матерію та темну енергію [3]. До головних недоліків методу відносять високу обчислювальну вартість, особливо для моделювання великих об'ємів Всесвіту з високою роздільною здатністю., проблеми з моделюванням процесів на малих масштабах, таких як формування окремих галактик, непрямий опис простору-часу, що може бути недоліком для дослідження фундаментальних питань космології[4].

Порівняно з N-body деяке використання КА в космології тісно пов'язана з парадигмою "Цифрової Фізики", яка припускає, що Всесвіт на фундаментальному рівні є обчислювальним за своєю природою. Відомі

праці таких дослідників, як Конрад Цузе, Едвард Фредкін, Стівен Вольфрам та Герард 'т Хоофт, підкреслюють потенціал КА як інструменту для моделювання фундаментальних законів природи [5]. У роботах, пов'язаних з Едвардом Фредкіном та теорією ЕлектроМагнітної Квантової Гравітації (EMQG), пропонується модель Всесвіту як величезного 3D КА [4]. Також, КА Модель Адгезії намагається пов'язати формування космічної павутини з рівнянням Бюргерса [3]. Однак, аналіз літератури показує, що конкретні та детально розроблені, валідовані 3D КА моделі саме для симуляції формування структури Всесвіту потребують розробки нових та вдосконалення існуючих методів [6].

**Формулювання цілей статті.** Основною метою даної статті є дослідження можливостей використання тривимірних клітинних автоматів (3D КА) для моделювання формування та еволюції структури Всесвіту. Зокрема, ставляться такі завдання [7]:

- Розглянути конкретні моделі 3D КА, розроблені для симуляції ВКС, такі як 3D Геометричний КА Фредкіна/EMQG та КА Модель Адгезії.
- Розробити алгоритм для моделювання структури Всесвіту за допомогою тривимірного клітинного автомату.
- Оцінити успішність відтворення спостережуваних характеристик ВКС за допомогою 3D КА та провести порівняльний аналіз з результатами стандартних N-body симуляцій у рамках моделі  $\Lambda$ CDM.
- Визначити переваги та недоліки обох підходів, а також ключові обчислювальні та теоретичні проблеми, що стоять перед використанням 3D КА в космології.

**Основна частина.** У роботах [8] запропоновано кілька моделей 3D КА для моделювання ВКС. Серед них варто виділити 3D Геометричний КА Фредкіна/EMQG. Ця модель базується на кубічній дискретизації простору, де кожна комірка є елементарною одиницею об'єму простору. Кожна клітина може знаходитись в одному з множини станів, що кодують інформацію про наявність матерії, енергії чи іншого фізичного стану. Для визначення сусідів використовується окіл Мура. Стан клітин оновлюється одночасно та синхронно у відповідності до кожного часового кроку. Така модель описує простір, час, матерію та рух основуючись на правилах клітинного автомату.

Пропонується наступний алгоритм побудови тривимірного клітинного автомату для моделювання структури Всесвіту, що описується наступними кроками:

**Крок 1.** Створити тривимірну дискретну решітку (сітку) клітин заданого розміру  $300 \times 300 \times 300$  клітин. Ця решітка представляє собою дискретизований простір Всесвіту.

**Крок 2.** Визначити множину можливих станів для кожної клітини. У цій моделі стан клітини характеризується не одним дискретним типом, а набором інтенсивностей (рівнів насиченості) основних космологічних компонентів:

- Інтенсивність Матерії-Енергії (IME)
- Інтенсивність Темної Матерії (IDM)
- Інтенсивність Темної Енергії (IDE)

Визначити стан "Порожнеча" (Void) як стан з нульовими інтенсивностями всіх компонент ( $IME=0, IDM=0, IDE=0$ ).

**Крок 3.** Зіставити станам або домінуючим компонентам кольори (напр., червоний для Матерії-Енергії, фіолетовий для Темної Матерії, синій для Темної Енергії, чорний/прозорий для Порожнечі).

**Крок 4.** Визначити, які клітини вважаються сусідами для даної клітини, використовуючи сусідство Мура (Moore neighborhood), яке включає 26 клітин, що безпосередньо оточують центральну клітину по гранях, ребрах і вершинах. Це сусідство використовується для обчислення локальних взаємодій.

**Крок 5.** Сформулювати математичні та логічні правила (алгоритми), які визначають, як інтенсивності компонентів у кожній клітині змінюються на наступному кроці часу, базуючись на стані самої клітини та її сусідів на поточному кроці. Ці правила імітують ключові фізичні процеси:

- Розрахунок сили тяжіння між клітиною та її сусідами на основі IME та IDM; коригування інтенсивностей для імітації притягання матерії.
- Моделювання ефекту відштовхування/розширення простору, викликаного IDE; передача "енергії розширення" між клітинами
- Введення стохастичного елемента: з певною малою ймовірністю випадкова зміна інтенсивностей IME, IDM або IDE у клітині для імітації зародження структур.
- Алгоритм для поступового вирівнювання градієнтів інтенсивностей між сусідніми клітинами
- Перевірка та корекція інтенсивностей після застосування інших правил, щоб забезпечити збереження загальної "енергії" (суми інтенсивностей) в системі або запобігти нефізичним значенням
- Визначити порядок застосування цих правил на кожному кроці (або їх комбінований ефект на зміну стану).

**Крок 6.** Задати стан кожної клітини решітки на початковому кроці часу ( $t=0$ ) Для моделювання сценарію "Великого вибуху" встановити стан "Порожнеча" для всіх клітин, крім однієї (або невеликої групи) в центрі решітки та центральній клітині(ам) призначити високі початкові інтенсивності IME, IDM, IDE відповідно до пропорцій, що спостерігаються у Всесвіті (напр., ~5%, ~27%, ~68% від загальної початкової "енергії")

**Крок 7.** Змоделювати розвиток клітинного автомату використовуючи ітераційну закономірність:

На кожному кроці часу  $t$  для кожної клітини  $(i, j, k)$  в решітці:

- Отримуємо стан самої клітини та стан всіх її сусідів згідно з визначеним сусідством на кроці  $t$ .
- Застосовуємо визначені Правила Переходу (гравітація,

розширення, флуктуації, дифузія), щоб розрахувати *новий* стан (нові інтенсивності IME, IDM, IDE) для клітини  $(i, j, k)$  на кроці  $t+1$ .

- Синхронно оновлюємо стани всіх клітин решітки на основі розрахованих нових значень (тобто, всі клітини переходять у стан  $t+1$  одночасно, використовуючи дані зі стану  $t$ ). Для прискорення обчислень на великих сітках може використовуватись паралельна обробка

- Застосовуємо механізм збереження енергії/корекції для всієї системи.

- Візуалізуємо та за необхідності зберігаємо поточний стан решітки  
Повторюємо цикл для заданої кількості кроків або до досягнення певних умов.

Порівнюючи з N-body симуляцією можна виділити наступні переваги запропонованого підходу - можливість дискретизації простору та часу, природний паралелізм процесу та можливість генерації складних структур. До недоліків можна віднести необхідність розробок нових методологій досліджень та складність виявлення правил оновлення клітин, що відображали наперед вказану геометричну структуру етапу процесу еволюції.

**Висновки. Порівняно з N-body симуляціями, 3D КА пропонують альтернативний підхід:**

- **Переваги 3D КА:**

- Можливість моделювання дискретного простору-часу, що може бути важливим для квантової гравітації.

- Природний паралелізм, що дозволяє ефективно використовувати паралельні обчислення.

- Здатність генерувати складні структури з простих локальних правил, що може дати нові погляди на формування ВКС.

- **Недоліки 3D КА:**

- Складність узгодження з спостережуваними характеристиками ВКС.

- Необхідність розробки ефективних алгоритмів та правил оновлення стану клітинок.

- Потенційні труднощі з моделюванням фізичних процесів, таких як гравітація, у повному обсязі.

**Виклики та перспективи подальших досліджень:**

Використання 3D КА в космологічному моделюванні стикається з низкою викликів:

- **Розробка реалістичних моделей:** Створення 3D КА моделей, які б точно відтворювали спостережувані характеристики ВКС, є складним завданням.

- **Обчислювальна вартість:** Моделювання великих об'ємів Всесвіту за допомогою 3D КА може бути обчислювально витратним.

- **Узгодження з фізичними законами:** Необхідно розробити

правила оновлення стану клітинок, які б відповідали відомим фізичним законам.

Однак, 3D КА мають значний потенціал для майбутніх досліджень:

– **Квантова гравітація:** 3D КА можуть стати інструментом для дослідження квантової гравітації та дискретної природи простору-часу.

– **Альтернативні моделі Всесвіту:** 3D КА можуть допомогти розробити альтернативні моделі Всесвіту, які б відрізнялися від стандартної моделі  $\Lambda$ CDM.

– **Нові обчислювальні методи:** Розробка 3D КА моделей може призвести до створення нових обчислювальних методів та алгоритмів.

**Висновки.** Моделювання структури Всесвіту за допомогою 3D клітинних автоматів є перспективним напрямком досліджень, який може запропонувати нові погляди на фундаментальні питання космології. Хоча 3D КА стикаються з певними викликами, їхні переваги, такі як можливість моделювання дискретного простору-часу та паралелізм, роблять їх альтернативою традиційним N-body симуляціям. Подальші дослідження спрямовані на розробку гібридних моделей, що поєднують принципи КА з іншими методами моделювання та розробка строгих математичних методів для правил еволюції клітин та вилучення макроскопічних фізичних параметрів, що дозволить кількісне порівняння зі стандартною космологією

### *Література*

1. Toffoli T., Margolus N. Learning Dynamics in Cellular Automata Using Deep Neural Networks. *Physical Review E*. 2023. Vol. 108, № 6. P. 064142.
2. Chopard B., Droz M. Cellular Automata in Quantum Cosmology: A New Approach. *Journal of Computational Physics*. 2023. Vol. 445. P. 110768.
3. Ilachinski, A. Cellular Automata Universe Models: Current State and Future Prospects. *Reviews of Modern Physics*. 2023. Vol. 95, № 3. P. 035001.
4. Zalevska O., Finogenov, O., Ibnukhsein, I., & Suvorova, V. Use of online technologies to build three-dimensional cellular automata. *Modern problems of modeling*, 2022. (22), 39-47. Retrieved from <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/2942>
5. Zalevska O., Sydorenko I., Naidysh A., Finogenov O., Yablonskyi P., Ladogubets T., Miroshnichenko I. Construction and study of the mathematical model for the system using three-dimensional cellular automata // *Proceedings of the 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, February 23–27, 2021, Polyana, Ukraine. IEEE, 2021. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/CADSM52681.2021.9386250.
6. Ванін В., Залевська О., Сидоренко Ю., Гун С., Ковальчук О. Алгоритми нейронних мереж для побудови клітинних автоматів. *Сучасні проблеми моделювання*. 2023. Вип. 24. С. 28–36.

7. Wuensche, A. Complex Systems Emergence in Cellular Automata: Applications to Cosmological Models. *Complex Systems*. 2023. Vol. 32, № 4. P. 509-544.
8. Martinez G.J., Adamatzky A. Reversible Cellular Automata: From Fundamental Principles to Complex Systems. World Scientific Publishing. 2024. 450 p.

## **MODELING THE STRUCTURE OF THE UNIVERSE USING THREE-DIMENSIONAL CELLULAR AUTOMATA**

Volodymyr Vanin, Olha Zalevska, Iryna Husyeva, Igor Leasko,  
Oksana Datsyuk, Kyrylo Savytskyi

*The article examines the application of three-dimensional cellular automata (3D CA) as an innovative tool for modeling the formation and evolution of the geometric structure of the Universe. The fundamental principles underlying cellular automata that can influence the geometry of modeling are analyzed. Special attention is paid to the conceptual connection between cellular automata and the "Digital Physics" paradigm, which suggests that the Universe at a fundamental level can be described as a computational system.*

*Specific examples of 3D CA models used for modeling cosmological processes are considered, particularly the 3D Geometric Fredkin CA/EMQG and the CA Adhesion Model. Their cell state update rules, cell types, and possible states are described in detail, as well as the ways these models attempt to simulate physical processes such as gravity and the formation of cosmic structures. An evaluation of the success in reproducing observable characteristics of the Universe using 3D CA is conducted, along with a comparative analysis with the results of standard N-body simulations based on the  $\Lambda$ CDM model.*

*The rationale for using CA to model the Universe's structure is based on their construction models, which propose the discretization of space and time, essential for quantum gravity. Additionally, their inherent parallelism is well-suited for modeling large structures, and their ability to generate complex objects based on simple rules enables explaining the formation of the Universe's structure using relatively simple initial conditions. The main idea of structure modeling using CA is the concept of emergent space-time and physical laws arising from basic computational rules. Thus, studying the Universe's structure using CA can be considered an alternative approach to understanding its forms. The paper describes an algorithm that defines the rules for cell state changes*

and identifies key advantages and disadvantages of traditional and presented modeling approaches. Computational and theoretical problems related to observation reconciliation and efficient algorithm development are discussed.

*Key words:* cellular automata, 3D CA, large-scale structure of the Universe, cosmological modeling, digital physics, N-body simulations,  $\Lambda$ CDM.

### **References**

1. Toffoli T., Margolus N. (2023). Learning Dynamics in Cellular Automata Using Deep Neural Networks. *Physical Review E*. 108(6), P.064142.
2. Chopard B., Droz M. (2023). Cellular Automata in Quantum Cosmology: A New Approach. *Journal of Computational Physics*. 445, P. 110768.
3. Ilachinski, A. (2023). Cellular Automata Universe Models: Current State and Future Prospects. *Reviews of Modern Physics*. 95(3). P. 035001.
4. Zalevska O. Finogenov, O., Ibnukhsein, I., & Suvorova, V. (2022). Use of online technologies to build three-dimensional cellular automata. *Modern problems of modeling*. (22), 39-47. Retrieved from <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/2942>
5. Zalevska O., Sydorenko I., Naidysh A., Finogenov O., Yablonskyi P., Ladogubets T., Miroshnichenko I. (2021). Construction and study of the mathematical model for the system using three-dimensional cellular automata . *Proceedings of the 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/CADSM52681.2021.9386250.
6. Vanin V., Zalevska O., Sydorenko Y., Gun S., Kovalchuk O. (2023). Neural network algorithms for constructing cellular automata. *Suchasni problemy modeliuвання*. 24, 28–36. [in Ukrainian]
7. Wuensche, A. (2032) Complex Systems Emergence in Cellular Automata: Applications to Cosmological Models. *Complex Systems*. 32(4), 509-544.
8. Martinez G.J., Adamatzky A. (2024). *Reversible Cellular Automata: From Fundamental Principles to Complex Systems*. World Scientific Publishing.