

Матковська О.М., Захарченко Р.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ,
email: oleksandra.matkovska@gmail.com

КВАРК-ГЛЮОНОВА ПЛАЗМА: ГІПОТЕЗА У РОЗВИТКУ

Анотація. Розглядаємо поняття кварк-глюонової плазми як особливої форми матерії. Розглянемо її роль у ранньому Всесвіті та способи її відтворення в лабораторних умовах, зокрема у Великому адронному колайдері (БАК). Спробуємо пояснити, як науковці шукають відповіді на фундаментальні питання про структуру матерії.

Abstract. Consider the concept of quark-gluon plasma as a special form of matter. Consider its role in the early universe and reproduction methods in laboratory conditions, particularly in the Large Hadron Collider (LHC). Let's try to explain how scientists seek answers to fundamental questions about the structure of matter.

Ключові слова: Кварк-глюонова плазма, протони, нейтрони, сильна взаємодія, Всесвіт, матерія, атоми, ядра, Великий адронний колайдер (БАК).

Keywords: Quark-gluon plasma, protons, neutrons, strong interaction, Universe, matter, atoms, nuclei, Large Hadron Collider (LHC).

Відомо, що речовина може перебувати в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому та газоподібному. Наприклад, при нагріванні лід переходить у воду, а подальше нагрівання води призводить до утворення водяної пари. Газ складається з молекул, які вільно рухаються в просторі та періодично зіштовхуються одна з одною. Проте, що відбудеться, якщо газ нагрівати ще сильніше? Кінетична енергія молекул зростатиме, і за певної температури зіткнення стануть настільки енергійними, що молекули почнуть розщеплюватися на окремі атоми.

Оскільки атоми складаються з ядра та електронів, то при подальшому нагріванні енергії зіткнень вистачає для іонізації — відриву електронів від ядер. Таким чином утворюється газ, що містить вільні електрони та іонізовані ядра. Такий стан речовини називається плазмою і вважається четвертим агрегатним станом. Плазма широко представлена в природі — прикладами є блискавка та Сонце.

Однак при ще вищих температурах відбуваються ще глибші зміни. Утворюється кварк-глюонна плазма – стан матерії, у якому розпадаються вже не лише атоми, а й протони й нейтрони, які формують атомне ядро. Ці частинки розкладаються на більш елементарні складові – кварки та глюони, де останні є переносниками сильної взаємодії (від англ. Glue – «клей») [1].

Можна припустити, що за надвисокої температури кварки можна «вивільнити» з протонів і нейтронів. Проте на практиці це не так — через дію сильної взаємодії, однієї з чотирьох фундаментальних сил природи, яка забезпечує зв'язування кварків в адронах [2]. Адрони – це узагальнена назва частинок, що складаються з кварків, зокрема протонів і нейтронів [3].

Особливістю сильної взаємодії є її незвична поведінка з відстанню: на відміну від, скажімо, гравітації чи електромагнетизму, вона не зменшується, а зберігає свою силу або навіть посилюється із зростанням відстані між кварками. Це означає, що спроба відокремити кварк від антикварка вимагає надзвичайно великої енергії. Наприклад, у мезоні — адроні, що складається з кварка й антикварка – спроба розділити ці частинки призводить до появи нової пари кварк–антикварк, оскільки енергія, витрачена на розрив, достатня для створення нових частинок згідно з еквівалентністю маси та енергії.

Таким чином, кварки не існують у вільному стані за звичайних умов. Але існує спосіб обійти це обмеження: замість того щоб намагатися розділити адрони, їх слід стиснути. За екстремально високої щільності простору між частинками кварки і глюони починають взаємодіяти так інтенсивно, що межі між окремими адронами зникають, утворюючи кварк-глюонний «суп» – фазу майже вільних кварків і глюонів. У такому стані частинки більше не прив'язані до конкретних протонів чи нейтронів, що і дозволяє досліджувати кварк-глюонну плазму.

Для виникнення такого стану потрібні умови з надзвичайною густиною. Слід урахувати, що атомне ядро приблизно в 10 000 разів менше за весь атом, а отже, щільність, необхідна для «стирання» меж навіть між компонентами ядра, повинна бути надзвичайно високою. Такі умови реалізуються лише у виняткових астрофізичних об'єктах, зокрема всередині нейтронних зір — найщільніших відомих структур у Всесвіті.

Проте, як тоді вчені вивчають цю речовину? Вони змінюють ще один параметр окрім щільності - енергію. Для дослідження плазми вчені відтворюють цей стан у лабораторіях шляхом зіткнення важких ядер. Це все відбувається у Великому адронному колайдері, де використовується атом свинцю. Вчені іонізують атоми свинцю, прискорюють до швидкості, близької до швидкості світла, а потім зіштовхують. У момент зіткнення енергія перетворюється на масу

і утворюються тисячі нових частинок, всі ці нові частинки взаємодіють між собою і утворюють ще більше нових частинок і це підвищує щільність, якої достатньо для утворення плазми [4].

Кварк-глюонна плазма була тим, що відбулося в перші мікросекунди Великого вибуху, мала вигляд сфери радіусом близько 50 кілометрів і проіснувала недовго. Плазма зникала у міру розширення Всесвіту, стаючи менш гарячою і менш щільною. Після цього утворилися адрони, потім ядра атомів, самі атоми, зірки, Галактики і, нарешті, ми [5].

Всесвіт пройшов через кілька фазових переходів, але перехід від кварк-глюонної плазми до адронів є єдиним, що нам на цей час можливо відтворити в лабораторних умовах та вивчати. Один із найважливіших експериментів, що досліджує кварк-глюонову плазму - ALICE [6]. Він аналізує продукти розпаду плазми, що дозволяє вченим вивчати її властивості. Наприклад, було виявлено, що кварк-глюонова плазма поводить себе більше як рідина, ніж як газ. Це було несподіванкою, оскільки раніше вважалося, що вона буде поводитися як ідеальний газ [7].

У майбутньому планується побудова кварк-глюонового фентоскопу, щоб картографувати розташування, характер руху та розміри кварків та глюонів у середині протонів та нейтронів. Такі карти дозволятимуть аналізувати кореляції між частинками, що виникають у процесі зіткнень важких іонів, і отримувати інформацію про розміри та форму області випромінювання частинок [8]. Лабораторія імені Джеферсона шукає кошти та схвалення уряду на спорудження такого фентоскопу, де електрони стикатимуться з поляризованими протонами та ядрами свинцю, які буде прискорено фактично до швидкості світла [9]. Цей пристрій може не лише відповісти на питання про природу сильної взаємодії, а й відкрити двері до нового розуміння матерії у Всесвіті.

Вивчення кварк-глюонової плазми є надзвичайно важливим для розуміння того, як утворився наш Всесвіт, з яких частинок він побудований і як взаємодіють ці частинки. Цей стан матерії дозволяє вивчити найперші моменти існування Всесвіту та перевірити фундаментальні теорії фізики. Відтворення й дослідження кварк-глюонової плазми у лабораторіях – це складне завдання, але саме воно наближає нас до відповіді на запитання про будову матерії, природу сильної взаємодії та межі дії елементарних частинок.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Кварк-глюонна плазма. (n.d.). *Вікіпедія*. https://uk.wikipedia.org/wiki/Кварк-глюонна_плазма

- [2] Сильна взаємодія. (n.d.). *Bikinedia*. https://uk.wikipedia.org/wiki/Сильна_взаємодія
- [3] Адрон. (n.d.). *Bikinedia*. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Адрон>
- [4] ATLAS observes top quarks in lead-lead collisions. (n.d.). *ATLAS Experiment at CERN*. <https://atlas.cern/Updates/Briefing/Observation-Top-PbPb>
- [5] The 1st microsecond of the Big Bang. (n.d.). *EarthSky*. <https://earthsky.org/space/1st-microsecond-of-the-big-bang/>
- [6] ALICE. (n.d.). *CERN*. <https://home.web.cern.ch/science/experiments/alice>
- [7] How particles of light may be producing drops of the perfect liquid. (n.d.). *U.S. Department of Energy*. <https://www.energy.gov/science/articles/how-particles-light-may-be-producing-drops-perfect-liquid>
- [8] Femtoscopy using Lévy-distributed sources at NA61/SHINE. (2024). *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2410.13975>
- [9] Professor Puckett's group prepares new measurements of "femtoscopic" neutron structure at Jefferson Lab. (2021). *University of Connecticut Department of Physics*. <https://physics.uconn.edu/2021/08/10/professor-pucketts-group-prepares-new-measurements-of-femtoscopic-neutron-structure-at-jefferson-lab/>