

ВИКОРИСТАННЯ АНАЛОГІЙ В КОЛЕКТИВНИХ МОДЕЛЯХ АТОМНИХ ЯДЕР (ОПТИЧНА, КЛАСТЕРНА, ЯДЕРНА МАТЕРІЯ)

У статті здійснено огляд виникнення, розвитку та формування колективних моделей ядер. Автори наводять приклади використання методу аналогій в навчальному процесі вищої школи під час вивчення теми "Моделі ядер".

Ключові слова: колективні моделі ядер, метод аналогій.

Постановка проблеми. У попередніх статтях [1, 2, 3] ми докладно зупинилися на необхідності широкого застосування методу аналогій при викладанні курсу ядерної фізики для студентів природничих спеціальностей вищих навчальних закладів. Найчастіше даний метод рекомендуємо застосовувати при вивченні теми "Моделі ядер", оскільки моделі станів атомних ядер історично розвивались як аналогії до відомих агрегатних станів речовини (тверде тіло, рідина, газ). Для викладача буде корисним при викладанні розділу перейти від фізичних характеристик певного агрегатного стану речовини до моделі ядра, яка базується на аналогічних фізичних характеристиках. Завдяки чому, досліджуючи і розв'язуючи задачі, в яких визначаються фізичні характеристики речовини, ми можемо за аналогією перенести їх на атомне ядро. Досвід показує, що порівняльні характеристики, наприклад, густини ядерної речовини з густиною твердих чи рідких тіл, коефіцієнту поверхневого натягу ядерної краплини і рідини та ін. запам'ятовується студентом набагато краще, ніж при викладанні теми без застосування аналогій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час існує велика кількість моделей атомних ядер (мал. 1), кожна з яких обов'язково базується на припущенні, що ядерна матерія знаходиться в певному "агрегатному стані". Підтвердження цієї тези дослідники шукають в експериментах. Оскільки експериментальних результатів накопичено велику кількість і часто вони суперечливі, то кожна модель базується на певному обмеженому колі отриманих даних для певного (часто дуже обмеженого) кола атомних ядер, і узагальнюючої моделі, що описувала б усю сукупність ядер, досі не створено.

Узагальнюючи коло існуючих моделей ядер, їх можна умовно розділити на три великі групи:

1. Колективні моделі – моделі з сильною взаємодією нуклонів (ядро як тверде тіло, що складається з нуклонів, або нуклонна рідина);

2. Одночастинкові моделі – моделі незалежних частинок (нуклонний газ, обмежений об'ємом ядра);

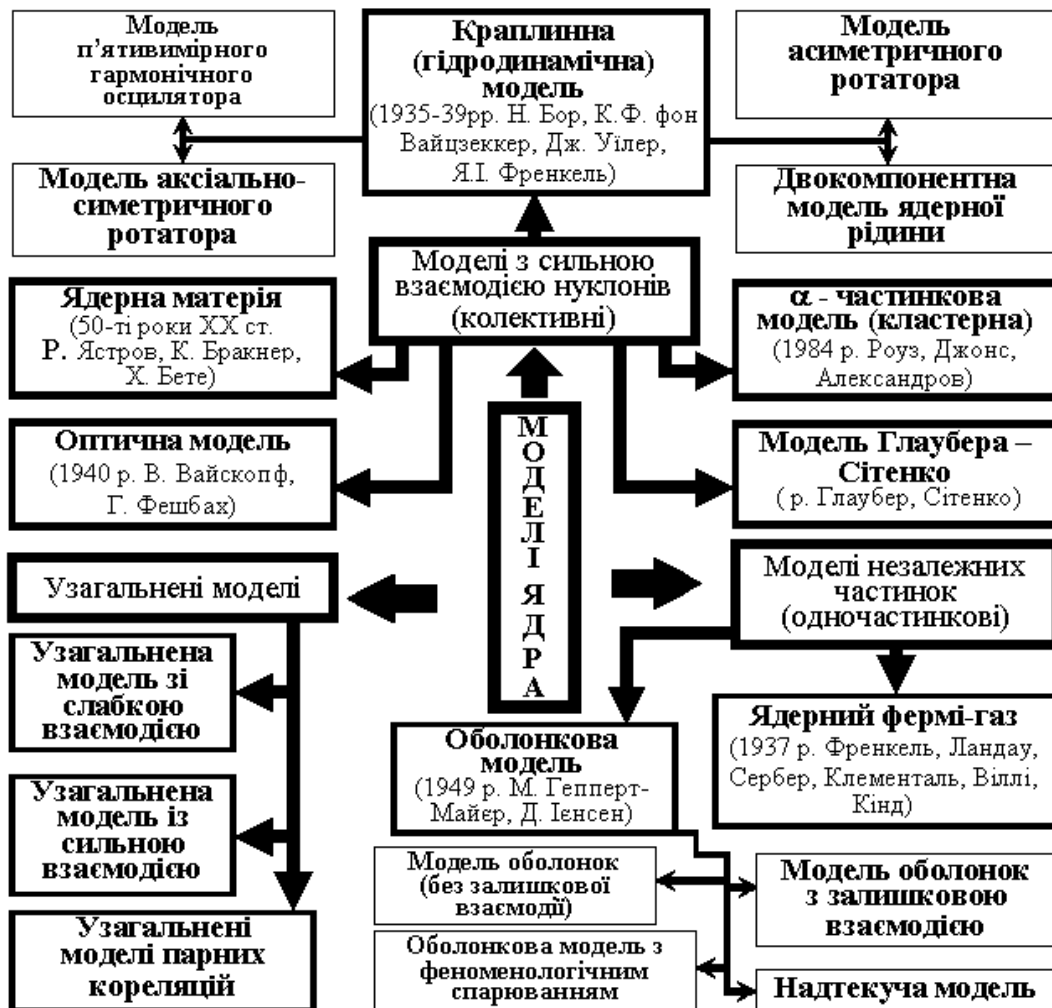
3. Узагальнені моделі – моделі, що об'єднують особливості колективних та одночастинкових моделей (ядро є згустком ядерної матерії тієї чи іншої форми, оточеної декількома зовнішніми нуклонами. Властивості остова (кора) описується однією із моделей першої групи, властивості зовнішніх нуклонів – моделлю з другої групи). Крім того, вводиться більш або менш інтенсивна взаємодія між колективними (кор) і одночастинковими (зовнішні нуклони) ступенями вільності. Аналогією таких моделей є двофазна система – згусток рідини (або тверде тіло здатне до деформацій), що знаходиться в динамічній рівновазі зі своєю парою [4].

Розглянемо моделі першої та третьої груп, в яких враховуються колективні ступені вільності всього ядра (моделі першої групи) і кора – (третья група ядер). Дані моделі базуються на постулатах, що радіус дії ядерних сил між нуклонами і довжина вільного пробігу нуклонів в ядрі (або корі) малі в порівнянні з його радіусом. Подібні властивості мають рідини (радіус молекулярної дії малий) і тверді тіла (амплітуда коливань атомів в кристалічній решітці набагато менша розмірів кристалу).

При такому підході розглядаються лише колективні ступені вільності, а індивідуальними ступенями вільності окремих нуклонів можна знехтувати. При цьому для опису збуджень ядер в даний момент для кожного конкретного ядра потрібно принаймні п'ять параметрів, які мають свої значення в кожному ядрі.

Експериментальною базою означених моделей є дослідження колективних збуджень атомних ядер: квадрупольного (ядро послідовно стає витягнутим або сплюснутим еліпсоїдом), октупольного (ядро в деформованому стані приймає грушовидну форму) та інших типів. У даній області накопичена значна за обсягом інформація, яка аналізується в рамках великої кількості моделей колективного руху ядра. Основні риси колективних збуджень ядер задовільно відображаються найпростішими колективними моделями – гармонічним вібратором і жорстким аксіальним ротатором. Однак ці моделі непридатні для опису більш тонких деталей спектра збуджень ядер. Природний шлях розвитку моделей – розглядати все більш складні конструкції колективних гамільтоніанів, які містять дедалі зростаючу кількість внутрішніх (по суті "підгінних") параметрів, що дозволяють "якісно" узгодити модель з певним об'ємом існуючих експериментальних даних. Цей прагматичний ("узгоджувальний") критерій настільки

психологічно ефективний, що дозволяє породжувати нові варіанти моделей із зростаючою кількістю параметрів. Кількість таких моделей на сьогодні вже досягає близько 40.



Мал. 1. Моделі атомних ядер

Моделі, що базуються на колективних ступенях вільності ядер можна умовно розділити на три групи:

1. Феноменологічні моделі колективних збуджень парних ядер. Ядро розглядається як краплина неперервного середовища і рух ядра описується низкою колективних змінних – зазвичай в моделях використовуються параметри квадрупольної деформації поверхні ядра. До таких моделей можна віднести модель ядерної матерії, гідродинамічну (краплинну) модель, модель п'ятивимірного гармонічного осцилятора, модель Жана-Вілетса, модель Давидова-Чабана та її варіанти: моделі Кумара, Тамура-Комаї, Работнова-Серьогіна, Грайнера-Фесслера, тощо.

2. Варіанти об'єднаної моделі збуджень ядер, в якій виділяється кор з парною кількістю нуклонів, причому його рух описується параметрами квадрупольної деформації, а також один або більше "зовнішніх" нуклонів, що взаємодіють між собою і з кором. Моделі цього типу поділяються на два варіанти: а) передбачається наявність у кора великої статичної деформації, відповідно ядро володіє ротаційним типом спектра збуджень; б) передбачається в кора вібраційний спектр збуджень – квадрупольні коливання поверхні майже сферичної форми. До даних моделей можна віднести оптичну та кластерну моделі, модель Нільсона, модель Глаубера-Сітенко, узагальнені моделі зі слабкою та сильною взаємодією та узагальнені моделі парних кореляцій.

3. Мікроскопічні моделі колективного руху ядра. Дані моделі успішно описують такі інтегральні характеристики ядерних збуджень, як моменти інерції для ротаційних спектрів ядер. До даних моделей відносяться різноманітні ротаційні моделі [5].

Історично першою виникла модель необмеженої ядерної речовини в 30-их роках ХХ ст. Її інтенсивно розвивали в кінці 50-х років Ястров, Бракнер, Бете та ін. Сьогодні дана модель найчастіше застосовується як модель ядерної матерії Бете-Бракнера. Суть моделі: необмежена ядерна речовина містить N нейтронів і Z протонів: $N \rightarrow \infty$, $Z \rightarrow \infty$, так що $A = N + Z \rightarrow \infty$ при $N/Z = const$, з

відсутньою кулонівською взаємодією між протонами. У різних варіантах моделі розглядалось як симетричну $N/Z=1$, так і несиметричну ($N/Z \neq 1$) ядерні матерії. Окремим випадком ядерної матерії в природі можна вважати нейтронну матерію ($N=A$, $Z=0$), яка згідно сучасним уявленням є основною частиною нейтронних зір.

Спочатку модель ядерної матерії не підтверджувалась експериментальними даними, оскільки був невідомим потенціал взаємодії між нуклонами. Однак, в 50-их роках були запропоновані реалістичні нуклон-нуклонні потенціали, які каталізували появу нових варіантів моделей ядерної речовини, після отримання досить точних експериментальних даних з розсіювання нуклонів з енергіями до 300 МеВ. Зазвичай, такий потенціал складається з декількох доданків, головний з яких описує комбінацію сильного відштовхування нуклонів на малих відстанях від кора і притягання – на великих. Пізніше були запропоновані моделі нуклон-нуклонної взаємодії з "жорстким" та нескінченним кором і більш реалістичні моделі з "м'яким" кором кінцевих розмірів. З кінця 50-х років до початку 80-х років популярні були феноменологічні потенціали Хамад-Джонстона з жорстким кором і потенціал Рейда – з м'яким. У практичній частині вивчення моделі необмеженої ядерної речовини можна запропонувати низку задач з визначення концентрації нуклонів та густини ядерної речовини та порівняння з аналогічними параметрами реальних речовин.

Задача 1. Згідно моделі ядерної матерії Бете-Бракнера оцініть густину ядерної речовини, концентрацію нуклонів у ядрі та середню відстань між нуклонами і порівняйте їх з відповідними величинами відомих вам речовин.

Розв'язок: Згідно визначення, густина ядерної речовини:

$$\rho_{\text{яд}} = \frac{m_{\text{яд}}}{V_{\text{яд}}}. \quad (1)$$

де m – маса речовини (кг), V – її об'єм (м^3).

Оскільки маси протонів і нейтронів практично однакові $m_n \approx m_p \approx 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг і $m_{\text{яд}} = N \cdot m_n + Z \cdot m_p = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot A$ кг, то

$$\rho_{\text{яд}} = \frac{m_{\text{яд}}}{V_{\text{яд}}} = \frac{1,66 \cdot 10^{-27} A}{\frac{4}{3} \pi R_{\text{яд}}^3} \quad (2).$$

З експериментів відомо, що $R_{\text{яд}} = 1,3 \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-15}$ м. Тоді $\rho_{\text{яд}} \approx 10^{17}$ кг/м³. Тут A – масове число (кількість нуклонів в ядрі). Звідси знаходимо концентрацію нуклонів в ядрі:

$$n = \frac{A}{V_{\text{яд}}} = \frac{A}{\frac{4}{3} \pi R_{\text{яд}}^3} = \frac{A}{\frac{4}{3} \pi (1,3 \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-15})^3} = \frac{A}{\frac{4}{3} \pi \cdot 1,3^3 A \cdot 10^{-45} \text{ м}^3} \approx 10^{44} \frac{\text{нукл}}{\text{м}^3}. \quad (3)$$

Середню відстань між нуклонами знаходимо із співвідношення:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{яд}}}{A}} \approx \sqrt[3]{10^{-44}} \approx 2,15 \cdot 10^{-15} \text{ м}. \quad (4)$$

Отримані результати говорять про зовсім незвичайний з точки зору макроскопічних тіл стан ядерної речовини (наприклад, для звичайних твердих тіл $n \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $\rho \approx (10^3 - 10^4) \text{ кг/м}^3$, $\delta \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$).

При розгляді моделі ядерної матерії слід зазначити, що область її застосування вузька. Це, перш за все, обчислення густини і питомої енергії зв'язку ядерної речовини, пояснення насичення ядерних сил, вивчення спектрів збудження і деяких ядерних реакцій.

З розвитком прискорювачів адронів і необхідністю пояснення перерізів їх розсіювання на ядрах (особливо при енергії налітаючих частинок в десятки МеВ) була запропонована **оптична модель ядра** [6]. Оптична модель розробляється шляхом зіставлення теоретичних і експериментальних даних, починаючи приблизно з 1953-1954 рр., після появи робіт Фешбаха, Портера і Вайскопфа, що пояснювали розсіювання нуклонів, дейтонів і α – частинок високих енергій на ядрах. У даній моделі постулювалось, що ядро є твердою, напівпрозорою для випромінювання сферою з певними коефіцієнтами заломлення і поглинання. У зв'язку з цим оптична модель відносилася до колективних. При попаданні на таку сферу частинка (хвиля) зазнає всіх видів взаємодії, характерних для поширення світла в "сірому" оптичному

середовищі: відбиття, заломлення, поглинання. Основне питання даної моделі – вигляд потенціалу взаємодії. Сьогодні оптичну модель розглядають як варіант узагальненої моделі ядра.

Оптичній моделі передували моделі Фермі і Бете (падаюча частинка взаємодіє з ядром із прямокутним потенціалом $V(r)$) і Бора – **модель ядра – абсолютно чорного тіла** (переріз реакції захоплення ядра плавно зменшується з ростом енергії частинки). Потенціал оптичної моделі – комплексний, виду $V(r) = -V_0(r)(1+i\xi)$. Параметр ξ вибирається пропорційним об'ємному або поверхневому поглинанню. Модель вимагає підбору як мінімум 9 параметрів для кожного ядра і кожної енергії падаючого адрона. Частина хвилі, що пройшла через ядро, отримує фазовий зсув δ і інтерферує з падаючою хвилею. У залежності від величини фазового зсуву інтерференція приводить до збільшення або зменшення перерізу реакції. На застосування аналогій при вивченні оптичних моделей можна запропонувати наступну задачу.

Задача 2. Застосувавши метод аналогій, визначте чи має фізичний зміст модель ядра – абсолютно чорного тіла.

Розв'язок: Скористаємося оптичними поняттями. Відомо, що при розсіюванні світла на оптичних неоднорідностях середовища (у випадку коли довжина хвилі світла набагато менша розмірів таких неоднорідностей) стають справедливими закони геометричної оптики і явища дифракції не відіграють суттєвої ролі. Розглянемо фраунгоферівську дифракцію хвиль з довжиною хвилі λ на чорному диску радіуса R при умові $\lambda \ll R$ (див. мал. 2). За диском на деякій відстані від нього виникає світла пляма – перший дифракційний максимум.

Мовою геометричної оптики це означає, що частина світлових променів розсіялася, причому напрямком розсіяних променів складає згідно умови максимуму для дифракції на диску кут $\vartheta \geq \lambda/R$ відносно початкового напрямку поширення хвилі. Поблизу диска на відстані меншій

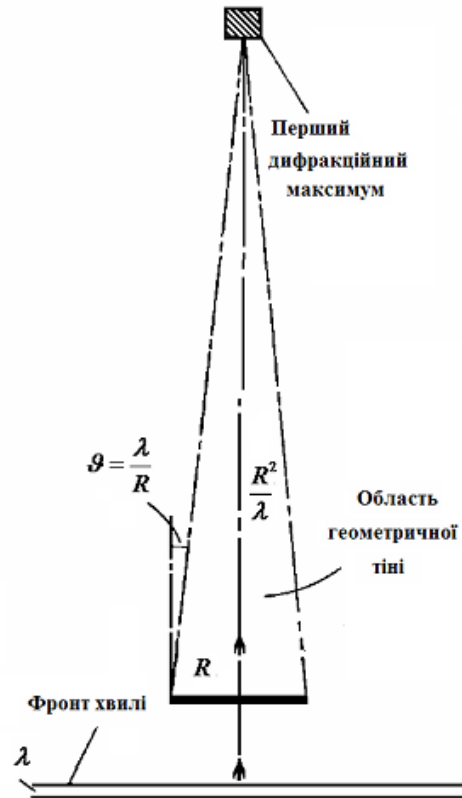
$R/\vartheta = R^2/\lambda$ буде спостерігатись область геометричної тіні (а значить спостерігатиметься картина, відповідна геометричній оптиці). Дифракційна картина виникає лише, починаючи з відстаней порядку R^2/λ . В

оптиці $\lambda \sim 10^{-5}$ см, $R \sim 1$ см і $R^2/\lambda \sim 10^3$ м. Отже, оскільки спостереження ведуться на відстанях, набагато менших цієї величини, то хвильове поле з більшою точністю описується геометричним наближенням.

При розсіюванні мікрочастинок на ядрах $R \sim 10^{-12}$ см, $\lambda \sim (10^{-13} - 10^{-14})$ см і $R^2/\lambda \cong (10^{-10} - 10^{-11})$ см, тоді як спостереження розсіювання проводиться на макроскопічних відстанях, набагато більших цієї величини. При цих умовах спотворення хвильового поля внаслідок дифракції істотно визначає всю картину розсіювання. На практиці це означає, що адронна хвиля при розсіюванні на ядрі завжди буде спостерігатись в реальних умовах в області геометричної тіні ядра, а значить – фіксуватись детектором. Отже модель ядра – абсолютно чорного тіла не має фізичного змісту.

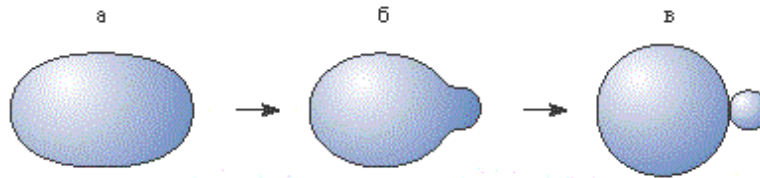
Кластерна модель ядра базується на відкритті кластерної радіоактивності ядер (Резерфорд, Роуз, Джонс, Александров). Найпростіша модель нуклонних асоціацій була запропонована Уїлером в 1937 році. У моделі розглядаються α -частинки всередині ядра, як короткоживучі, але порівняно стійкі утворення. Вони аналогічні, наприклад, згусткам сиру всередині кефіру. Через деякий час після свого утворення α -частинка розпадається на складові частини. Продукти розпаду цієї і інших частинок, що розпались, перебудовуються в нові α -частинки. Важливо, щоб час перебування в зібраному стані α -частинки був набагато більшим, ніж у розібраному.

У даний час розвиваються два теоретичних підходи до опису динаміки кластерного розпаду атомних ядер: а) Кластерний розпад як сильно асиметричний за масами утворюваних осколків спонтанний поділ (материнське ядро, що знаходиться в стані **a** до моменту розриву **b** плавно перебудовується, змінюючи свою форму і проходячи через проміжну конфігурацію **b** (мал. 3)). Опис такої перебудови здійснюється на основі краплинної моделі ядра; б) Надтекуча модель ядра [7] (дві куперівські пари протонів і нейтронів об'єднуються в α -частинку. У цьому випадку опис переходу до кінцевої конфігурації **b** здійснюється без введення проміжної конфігурації **b** одразу з конфігурації



Мал. 2. Дифракція на чорному диску

а) Оскільки нуклони складаються з трьох кварків, то в рамках цієї моделі говорять, що при сильному перекритті двох, трьох і т.д. нуклонів в атомних ядрах з певною ймовірністю можуть формуватися структури, які складаються з 6, 9 і т. д. кварків. Їх прийнято називати шести-, дев'яти- і т.д. кварковими мішками. Використовуючи модель, вдається розв'язувати задачу про розподіли і ймовірності утворення в атомних ядрах кластерів багатокваркової природи, наприклад шести-, дев'яти-, дванадцятикваркових мішків.



Мал. 3. Кластерна модель на основі краплинної моделі

Висновки. Наведені моделі атомних ядер використовують аналогії між певними властивостями ядер та фізичних систем іншої природи;

Аналогії, що ґрунтуються на подібності властивостей об'єктів різної природи є ефективним дидактичним засобом навчання. Як показує наша практика, їх застосування дозволяє добитися глибокого розуміння студентами (учнями) предмета навчання на всіх етапах здобування знань.

Реалізація задачного підходу при вивченні моделей ядер сприяє розвитку практичних умінь, що стимулюють творчість та ініціативність студентів у різних видах діяльності.

Використані джерела

1. Лебедь О. О. Використання аналогій при моделюванні будови атомного ядра в підручниках з квантової фізики [стаття] / О. О. Лебедь // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики : збірник наукових праць. Випуск VIII : Т. 2: Теорія та методика навчання фізики. – Кривий Ріг : Видавничий відділ НМетАУ, 2010. – С. 184-193.
2. Дубчак В. О. Застосування методу аналогій при викладанні теми "Ядерні реакції" [стаття] / В.О. Дубчак, О.О. Лебедь // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського нац. ун-ту ім. Івана Огієнка. – 2011. – №16. – С. 194-196.
3. Лебедь О.О. Про використання гідродинамічних аналогій при викладанні теми "Радіоактивні ряди" в курсі квантової фізики [стаття] / О.О. Лебедь, О.Ю. Дейнека // Нова педагогічна думка. – 2009. – № 3. – С.85-89.
4. Наумов А. И. Физика атомного ядра и элементарных частиц [підручник] / А. И. Наумов. – М. : Просвещение, 1984. – 384 с.
5. Гречухин Д.П. Критический обзор феноменологических коллективных моделей ядра [електронний ресурс] / <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore>.
6. Шапиро И.С. Оптическая модель ядра в свете современных данных [стаття] / И.С. Шапиро // УФН. – 1961. – т. LXXV, вып. 1. – С. 61-101.
7. Kadmsky S.G., Kadmsky V.G. Cluster Degrees of Freedom and Nuclear Reactions and Decays // Cluster Phenomena in Atoms and Nuclei. В.: Springer, 1992. P. 525-539.

Lebed A., Myslinchuk V., Rybalko A.

THE ANALOGY TO THE COLLECTIVE MODELS OF ATOMIC NUCLEI (OPTICAL, CLUSTER, NUCLEAR MATTER)

The article presents an overview of the emergence, development and formation of collective models of nuclei (optical, cluster, nuclear matter). Effective formation of concepts of modern models of the atomic nucleus is impossible without reference to the specific results of the corresponding experiments. The basis of any model engine is the analogy of the kernel, as the object of the microcosm with certain properties, some macrocosm CTU with a similar set of properties. The use of analogies in the construction of models of core facilitates the students to study the topic. The authors give examples of the use of the benchmarking method in the educational process of higher school in the study of special topics in nuclear physics. The use of one or another analogy for modeling atomic nucleus requires clear reasoning and need to specify the limits of its application in a particular model. This helps prevent the possibility of identifying students model with the real object.

Key-words: collective model of the nucleus, benchmarking method.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2015