

Д. І. Сікора, В. О. Шкода-Ульянов, Л. О. Шабаліна

**ПРО ВИКОРИСТАННЯ РІВНОВАЖНОГО
СПЕКТРА БЕЛЕНЬКОГО—ТАММА ПРИ
ДОСЛІДЖЕННІ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ
НА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ***

Як відомо, у 1929 р. Д. В. Скобельцин перший спостерігав утворення злив електронів та фотонів, що потім експериментально досліджувались в роботах багатьох вчених. Серед них важливе значення мали досліди Б. Россі, в яких встановлена залежність числа утворених в зливі частинок від товщини свинцевого поглинача.

У 1937 р. Баба і Гайтлер і незалежно Карлсон і Оппенгеймер у своїх роботах підкреслили, що багато злив, утворених космічними променями, можна пояснити виникненням електромагнітного каскаду. Теорія, яка описує розвиток електромагнітного каскаду (зливи) в речовині, була створена рядом вчених, серед яких особливо важливе значення мали роботи Л. Д. Ландау, Ю. Б. Румера. Найбільш точна аналітична теорія цих процесів, що є тепер загальноновизнаним, дана роботами І. Є. Тамма та С. З. Беленького. Ці роботи були успішно розвинені І. П. Іваненко. Створена ними теорія в області відносно високих енергій підтверджена спеціально поставленими експериментами, зокрема у нас в СРСР дослідями під керівництвом С. М. Вернова, який звернув увагу на методику проведення, особливо при одержанні експериментальних даних, які зіставлялися з теорією.

Лавинна теорія, яка описує проходження електромагнітного випромінювання високої енергії через речовину, допомогла розв'язати ряд складних питань, які

* Матеріали статті доповідались на Ювілейній республіканській конференції по ядерній фізиці елементарних частинок (Ужгород, 6—7 червня 1967 р.).

пов'язані з утворенням злив в космічних променях. Застосування результатів квантової електродинаміки при дослідженні явищ, які проходять в космічних променях, виявилось дуже ефективним і дало можливість розібратися в цілому ряді процесів, які мають місце в речовині при космічному випромінюванні не тільки в якісному, але й кількісному відношенні. Таким чином, створена теорія, яка дозволяє надійно виділити область космічних явищ, які пов'язані з специфічною ядерною взаємодією, з області явищ, обумовлених електромагнітними взаємодіями.

Зрозуміло, що при дослідженнях процесів з космічним випромінюванням основну увагу приділяють області відносно високих енергій. Менш дослідженою виявилась область порівняно невеликих енергій — десятки мегаелектронвольт. У результаті як в цій області енергій, так і при значно більших лавинна теорія поки що практично не використовувалась для постановки та інтерпретації експериментів по вивченню ядерних реакцій, які вивчаються із застосуванням електронних прискорювачів, хоч є всі підстави вважати, що її використання в даному випадку може бути значно більш ефективним, ніж в фізиці космічних променів, тому що одержання надійних висновків тут полегшується більш чітко визначеними граничними та початковими умовами (з достатньою точністю відомі енергія, інтенсивність бомбардуючого випромінювання, вид частинки).

Якщо ще порівняно недавно проходження частинок високої енергії через речовину в значній мірі використовувалось для перевірки теорії електромагнітних взаємодій, то зараз, як цю думку підкреслює в одній з своїх робіт Б. Россі, результати теорії можна з повним обґрунтуванням використати як основу для пояснення спостережених явищ.

Що стосується конкретно питання про точність рівноважного спектра Беленького—Тамма, то найбільш досконалий аналіз більшої частини опублікованих праць з цієї точки зору знаходиться в роботі С. З. Беленького та І. П. Іваненко [1]. З цього аналізу виходить, що точність, з якою визначено рівноважний спектр Беленького—Тамма, дорівнює кільком процентам. Вона визначається точністю перерізів елементарних процесів і є, наприклад, такого ж порядку, як і точність спектра Шіф-

фа, який широко застосовується при вивченні фотоядерних реакцій.

Маючи на увазі все вищезгадане, в 1957 р. та в наступні роки на лінійних прискорювачах УФТІ АН УРСР в м. Харкові і на бетатроні Ужгородського держуніверситету були поставлені досліди і проведені деякі теоретичні дослідження, в яких виявилась можливість використання рівноважного спектра Беленького—Тамма для розв'язання деяких фізичних та прикладних задач з використанням пучків від електронних прискорювачів. Так, була розглянута можливість використання рівноважного спектра Беленького—Тамма для визначення функцій збудження фотоядерних реакцій. Про актуальність постановки такої задачі можна судити з таких міркувань.

У зв'язку з відсутністю інтенсивних джерел монохроматичних γ -квантів високої енергії у більшості випадків як бомбардуюче випромінювання використовуються неперервні по енергії спектри γ -квантів. Тільки в області енергій порядку 20 Мев положення в останні роки змінилося, тому що вдалося створити основні для використання явища анігіляції на льоту монохроматичні джерела γ -квантів відносно невеликої інтенсивності, які придатні для дослідження реакцій, що йдуть з досить великою імовірністю. Просування в цьому напрямку в області більш високих енергій зустрічається з великими труднощами.

З другого боку, при дослідженні спектра гальмового випромінювання, як бомбардуючого випромінювання, задача про знаходження функції збудження фотоядерних реакцій зводиться до розв'язку інтегрального рівняння Вольтерра I-го роду, тобто до розв'язання так званої некоректної задачі. Труднощі одержання розв'язку такого роду задач давно відомі. Вони особливо великі у випадку, коли задані функції знаходяться дослідним шляхом. Тому не дивно, що навіть в найбільш доступній і найбільш дослідженій області енергії порядку гігантського резонансу дуже часто спостерігається невідповідність знайдених таким шляхом різними авторами функцій збудження фотоядерних реакцій. Дуже часто різниця характеризується множителем 2÷3. А область за гігантським резонансом на предмет одержання функцій збудження фотоядерних реакцій (мається

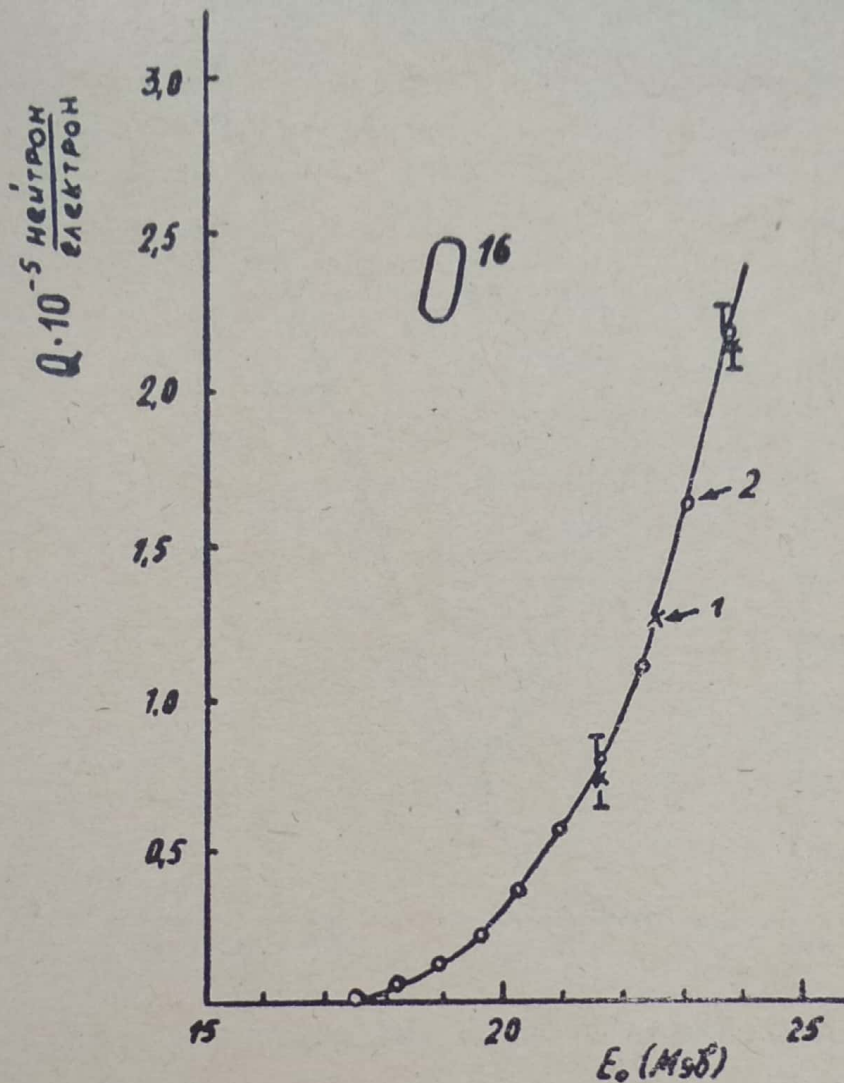


Рис. 1. Вихід за функціями збудження γ -реакції на O^{16} [8] і [9]:

1 — наші експериментальні дані (нанесена статистична похибка $\pm 2.5\%$); 2 — розрахунок за рівноважним спектром Беленького—Тамма з використанням середнього перерізу з робіт [8] і [9], одержаних з монохроматичними γ -квантами.

на увазі область енергій до мезоноутворення) слід вважати в теперішній час практично не дослідженою. Труднощі дослідження тут особливо великі через відносно малу величину перерізів і недостатню точність експерименту для розв'язання задачі відомими тепер математичними способами та існуючими експериментальними методами.

Відмітимо, що незважаючи на великі успіхи, досягнуті в останні роки в розв'язанні некоректно поставлених задач, зокрема завдяки роботам А. Н. Тихонова, В. К. Іванова та ін., їх можна поки що розглядати як

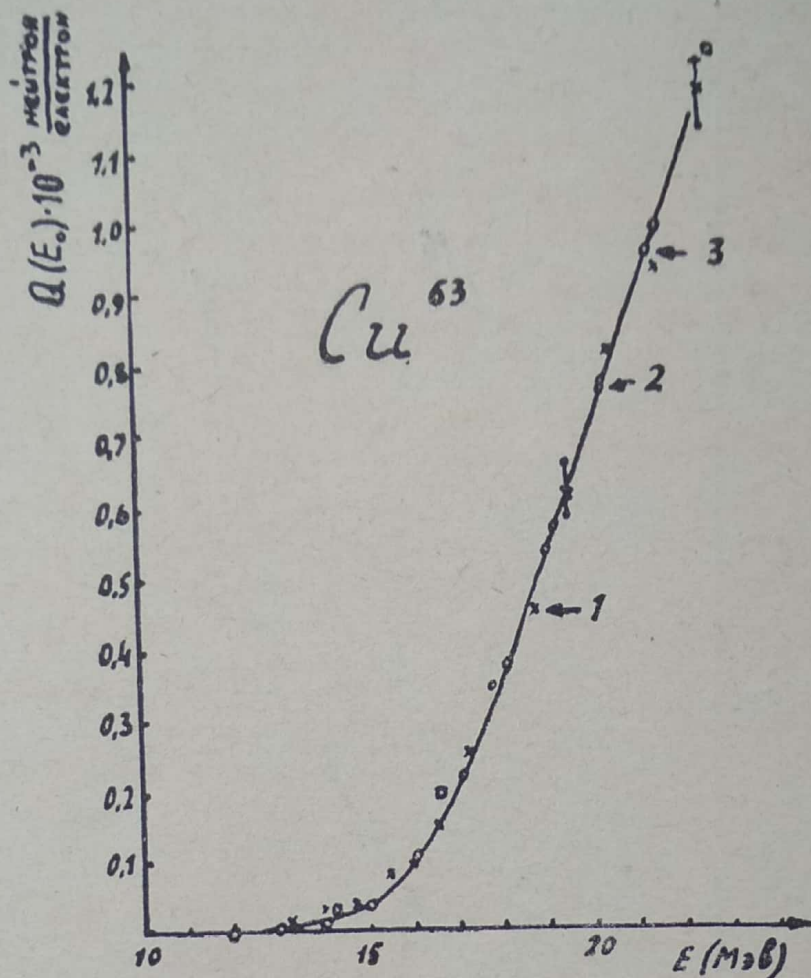


Рис. 2. Вихід фотонейтронів із міді, обумовлений реакцією $\text{Cu}^{63}(\gamma n)\text{Ce}^{62}$:

1 — наші експериментальні дані (нанесена статистична похибка $\pm 2,5\%$, гранична похибка $7,5\%$); 2 — розрахунок за рівноважним спектром Беленького—Тамма з використанням перерізу γn -реакції, одержаного з монохроматичними γ -квантами ($\beta = \beta_{ion} + \beta_{rad}$); 3 — зворотна задача — розрахунок по експериментальному перерізу і γn -реакції виходу фотонейтронів

перший етап в створенні алгоритмів та логічних схем для випадку, коли задачу необхідно розв'язувати з використанням функцій, заданих числово з неминучими експериментальними неточностями. Тому стає ясным, що при розв'язанні подібного роду задач бажано проводити дослідження з використанням різних математичних способів і різних експериментальних методів, досягаючи при цьому тотожності в знайдених таким шляхом результатах.

Незважаючи на дуже копітке дослідження питання про точність рівноважного спектра Беленького—Тамма,

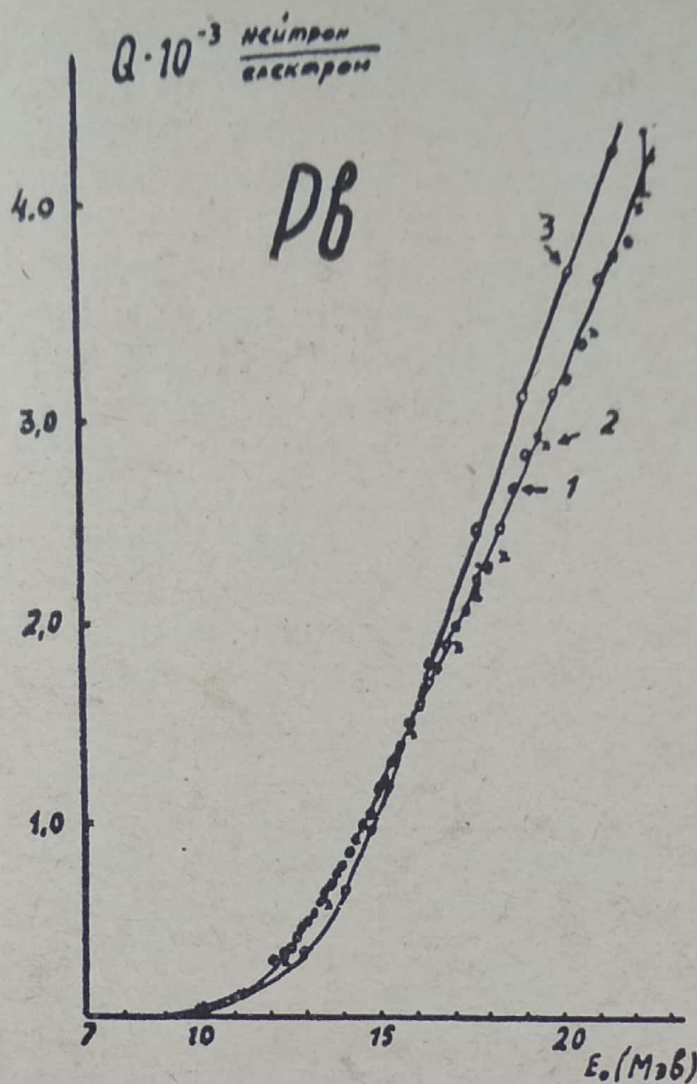


Рис. 3. Вихід фотонейтронів із свинцю, обумовлений γn -реакцією:
 1 — наші експериментальні дані (нанесена статистична похибка $\pm 2\%$, гранична похибка оцінюється в $9,7\%$); 2 — зворотна задача — розрахунок виходу з допомогою рівноважного спектра Беленького—Тамма і перерізу, одержаного з допомогою монохроматичних γ -квантів французькими вченими.

яке проведене в цілому ряді праць [1, 2], при постановці досліджень пов'язаних з застосуванням цього спектра, дуже бажано було підтвердити його точність в області відносно невеликих енергій та в області енергій $E \sim E_0$, де, як відомо, можуть виникнути невідповідності, обумовлені недостатньою точністю перерізів, які використовуються в аналітичній теорії для цієї області енергій.

У наших дослідженнях, початок яких в значній мірі був обумовлений допомогою, яку надавав академік А. К. Вальтер, для в'яснення цього питання були використані найбільш точні дані про функції збудження

γ , n -реакцій в Pb, Cu та O, які визначені французькими та американськими вченими [8], [9]. Ці дані були використані для розрахунків виходів фотонейтронів з Cu^{63} , Pb та H_2O з допомогою рівноважного спектра Беленького—Тамма і зіставлені на рис. 1, 2, 3 із знайденими в дослідках по визначенню відповідного виходу фотонейтронів з товстих зразків, виміряних на лінійних електронних прискорювачах УФТІ АН УРСР. На цих рисунках наведені наші експериментальні дані робіт [5], [6], в яких внесені поправки в калібровку енергетичної шкали прискорювача і врахована примітка Россі про відповідний вибір критичних енергій, яка вперше використана ним при зіставленні його числових результатів розв'язання кінетичних рівнянь лавинної теорії, проінтегрованих по глибині, з даними аналітичної теорії Беленького—Тамма, в якій використані інші значення для перерізів елементарних процесів [2].

У наших роботах [5], [6] розвинені експериментальні методи дослідження фотоядерних реакцій з використанням великих мішеней, при цьому треба мати на увазі, що у випадку досліджень дорогокоштуючих ізотопів їх можна застосовувати у вигляді тонких мішеней, які розміщуються відповідним чином в товстій мишені, близькій з ним Z , яка буде служити розмножником γ -квантів, а вихід реакції можна визначати, використовуючи ідею квантомера [11], [6]. У ряді випадків доцільно використати циліндр Фарадея одночасно як абсолютний монітор електронів і як мішень — джерело фотонейтронів [12], [5].

Як видно з рис. 1—3, для води та міді спостерігається добра відповідність між розрахованими даними і знайденими при дослідках. Гірша відповідність спостерігається для свинцю, хоча розходження тут у багатьох випадках не набагато перевищують статистичну похибку вимірювань. Гранична похибка вимірювань була значно більшою. При цьому треба мати також на увазі, що, на жаль, навіть з монохроматичними γ -квантами перерізи фотоядерних реакцій, які виміряно американськими вченими, з одного боку, і французькими, з другого, незважаючи на малі похибки, у ряді випадків значно відрізняються один від одного. Що стосується свинцю, то тут, крім даних, одержаних французькими вченими,

ми не маємо відповідних даних, одержаних з допомогою монохроматичних фотонів американськими вченими. Остання обставина в деякій мірі затруднює можливість зробити достатньо обгрунтований висновок по відношенню до свинцю.

Таким чином, в дослідженій нами області енергій E , досить близьких до E_0 , рівноважний спектр Беленького—Тамма досить добре, в межах точності експерименту по визначенню перерізів фотоядерних реакцій, узгоджується з відповідними експериментальними даними. Ця обставина є значною гарантією можливості використання рівноважного спектра Беленького—Тамма для розв'язання деяких фізичних та прикладних задач. До цього часу рівноважний спектр Беленького—Тамма нами був використаний для визначення функцій збудження γ , n -реакцій в кисні та міді, включаючи і область за гігантським резонансом. Нам вперше в цій області енергій вдалося визначити абсолютні значення функцій збудження цих реакцій. Для кисню за гігантським резонансом спостерігалися додаткові три максимуми [7], положення яких по енергії пізніше були підтверджені роботами інших авторів. Розглянуті і запропоновані нові методи розв'язку ряду прикладних задач, у тому числі і спосіб оцінки максимальної чутливості фотоядерних методів дослідження елементного складу в зразках великих габаритів.

Тепер нами разом з УФТІ АН УРСР проводиться робота по визначенню функцій збудження фотоядерних реакцій, які приводять до утворення ізотопів — джерел запізнілих нейтронів. Виясняється можливість використання методу [14] для визначення функцій збудження фотоядерних реакцій, які приводять до утворення важких ізотопів найлегших ядер (He^8 та ін.). Існування цього ізотопу, як відомо, було передбачено в свій час Я. Б. Зельдовичем, В. Й. Гольданським [10]; існують і експериментальні дані, які свідчать про спостереження цього ізотопу.

Як висновок, відмітимо що використання рівноважного спектра Беленького—Тамма для визначення функцій збудження фотоядерних реакцій дозволяє до застосованих математичних способів одержання перерізів фотоядерних реакцій з інтегрального рівняння Вольтерра I роду (метод різниці фотонів, метод Пенфольда—

Лейса, Крилова В. І., статистичний метод) додати ще один, який використовує специфічний вид ядра рівняння у цьому випадку. Крім того, поряд з можливістю одержання перерізів фотоядерних реакцій з використанням різних математичних методів розв'язання інтегральних рівнянь кінцевий результат можна одержати принципово другою експериментальною методикою, що, враховуючи вищезгадане про труднощі, з якими мають справу при вивченні фотоядерних реакцій, є дуже важливим фактором. До цього часу нами одержано перші попередні експериментальні дані по вивченню деяких з перелічених вище реакцій, які ведуть до утворення ізотопів — джерел запізнілих нейтронів, ці дослідження будуть проведені на лінійних електронних прискорювачах УФТІ АН УРСР.

ЛІТЕРАТУРА

1. С. З. Беленький, И. П. Иваненко, УФН, **19**, 4, 1959.
2. Б. Росси, Частицы больших энергий, ГИТТЛ, М., 1955.
3. Д. И. Сикора, В. А. Шкода-Ульянов, Тезисы докладов Всесоюзного совещания по космическим лучам, г. Апатиты, 24—31 августа 1964 г., «Наука», М., 1964.
4. Д. И. Сикора, В. А. Шкода-Ульянов, Изв. АН СССР, т. XXIX, № 9, серия физическая, 1965.
5. В. М. Грижко, Д. И. Сикора, В. А. Шкода-Ульянов, А. Д. Абраменков, Б. И. Шраменко, А. Н. Фисун, ЖЭТФ, **38**, 1370, 1960.
6. И. А. Гришаев, Д. И. Сикора, Б. И. Шраменко, В. А. Шкода-Ульянов, УФЖ, **8**, 1193, 1963.
7. И. А. Гришаев, Д. И. Сикора, В. А. Шкода-Ульянов, Б. И. Шраменко, Атомная энергия, январь, 1965.
8. J. Miller, G. Schuhl, G. Tzara, G. Tomas, Phys. Letters, **2**, 76, 1962; J. Miller et al., Nucl. Phys., **32**, 236, 1962.
9. R. L. Bramblett, y. T. Caldwell, R. R. Harvey, and S. C. Fultz, Phys. Rev., **133**, 870, 1964, № 4B.
10. А. И. Базь, В. И. Гольданский, Я. Б. Зельдович, УФН, **85**, 445, 1963.
11. А. П. Комар, С. П. Круглов, ЖЭТФ, **30**, 2, 1367, 1960.
12. В. А. Шкода-Ульянов, Об использовании равновесного спектра фотонов Беленького—Тамма для определения функции возбуждения образования нейтронов с помощью электронов высокой энергии. Некоторые проблемы современной физики ядра и элементарных частиц. Изд. Львовского университета, стр. 89, 1957; ЖЭТФ, **35**, 4, (10), 1042, 1958.