

# Особливості електромагнітного випромінювання, що виникає при зіткненні заряджених частинок



**Дмитро Тютюнник**  
молодший наук. співробітник  
Інституту теоретичної фізики  
ім. О. І. Ахієзера  
ННЦ "Харківський фізико-  
технічний інститут" НАН України,  
м. Харків

**В**ивчення фундаментальних основ навколишнього світу — фізики елементарних частинок — ніколи не обходилося без експериментальних досліджень. Експеримент завжди підказував, в якому напрямку потрібно "шукати" нові, ще невідомі закони та властивості природи, а також був механізмом відбору правильних теоретичних моделей опису явищ. Основна частина експериментальних досліджень у фізиці елементарних частинок проводиться на прискорювачах. В останні роки у зв'язку з бажанням глибше пізнати будову Всесвіту виникає необхідність сильно збільшувати енергії частинок, розігнаних на прискорювачах, та доводиться реалізовувати такі грандіозні та дорогі проекти як Large Hadron Collider, нещодавно запущений в CERN у Женеві.

Використання таких механізмів дозволяє одразу перевіряти багато прогнозів. Проте виникає багато запитань відносно різноманітних фізичних явищ, які відбуваються при зіткненні частинок, що мають велику енергію. Одним із таких питань є особливості електромагнітного випромінювання, яке виникає при зіткненні заряджених частинок.

Для початку нагадаємо, чим є випромінювання?

Навколо кожного електричного заряду існує електромагнітне поле. Якщо заряд перебуває у стані спокою, то це поле має тільки електричний складник, який називається кулонівським полем. При рівномірному русі заряду, крім електричного поля, виникає ще й магнітне, і вся ця конфігурація полів рівномірно рухається разом із зарядом. Однак, коли заряд відхиляється від прямолінійного руху

(і, таким чином, розповсюджується прискорено), то електромагнітне поле навколо нього не встигає одразу змінити напрямок свого руху, відривається і продовжує самостійне існування та рух у напрямку початкового руху заряду. Поле, що відірвалося від заряду, називають випромінюванням. Випромінювання, що виникає в результаті прискореного руху заряду через його розсіяння в полі деякого іншого заряду, називається гальмівним випромінюванням.

1934 року *Ганс Бете* і *Вальтер Гайтлер* вперше в рамках квантової електродинаміки розглянули процес гальмівного випромінювання електрона при його розсіюванні на атомі, що перебуває у стані спокою.

Гальмівне випромінювання електрона в полі атома у квантовій електродинаміці розглядається як процес обміну електрона та атома віртуальним фотоном (при цьому відбувається розсіяння електрона) та випускання електрона фотона. Відстані, які проходить віртуальний фотон, визначають характерну просторову ділянку, де розігрується процес випромінювання. Якщо енергія електрона достатньо велика, так що він може вважатися релятивістським, то електрон випромінює не у всі боки рівномірно, а переважно у напрямку свого руху. Інакше кажучи, при таких енергіях частинок віртуальні фотони рухаються переважно уздовж напрямку руху електрона і, таким чином, можуть проходити достатньо великі відстані.

Такі відстані називаються довжиною когерентності: вони обернено пропорційні частоті випромінюваного фотона і зростають зі збільшенням енергії електрона. При великих енергіях електронів і малих енергіях фото-



Ганс Бете (1906-2005)



Вальтер Гайтлер (1904-1981)

**Рис. 1.** Видатні німецькі вчені, які зробили істотний внесок у розвиток сучасної фізики. Вони першими розвинули теорію випромінювання швидких електронів при розсіюванні на атомах, яка виявляється дуже важливою при вивченні багатьох радіаційних явищ взагалі.

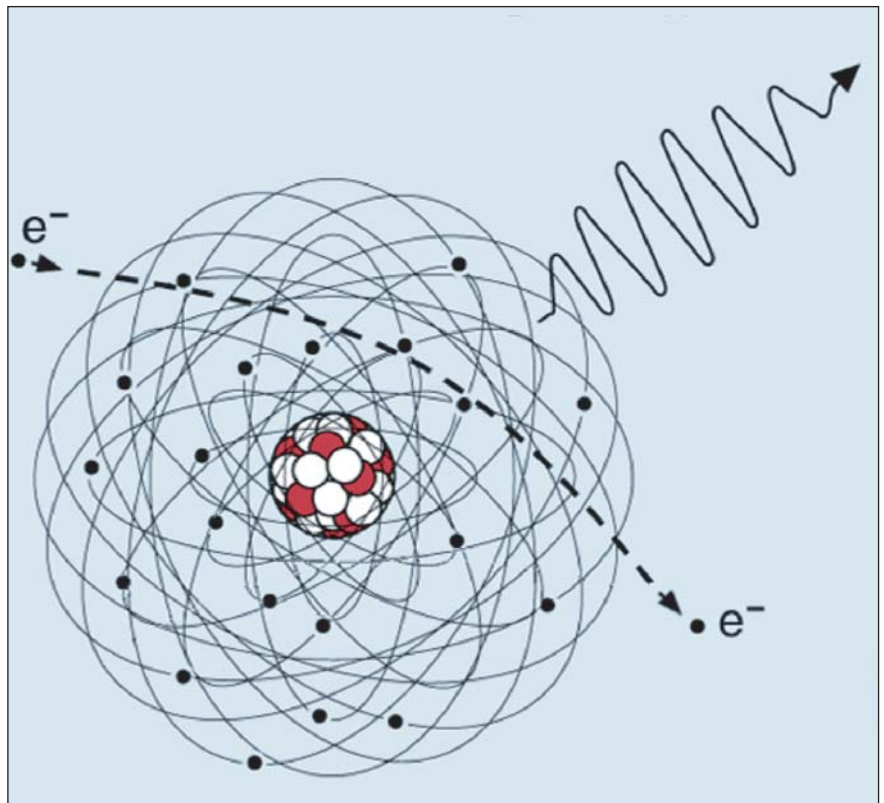
нів ця довжина може сягати великих значень, аж до масштабів порядку метрів, і цей факт слід враховувати у багатьох випадках (наприклад, при проектуванні детекторів випромінювання на прискорювачах). Тому найцікавішим є вивчення процесів випромінювання саме при високих енергіях взаємодіючих частинок, коли можна очікувати появу деяких нетривіальних явищ.

Віртуальний фотон проходить також певну відстань і в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху електрона. Але завдяки тому, що атомні електрони сильно екранують кулонівське поле ядра, яке ззовні атома експоненційно спадає, актуальні поперечні відстані не перевищують характерний радіус атома (який зазвичай приймають рівним радіусу атома в моделі Томаса-Фермі).

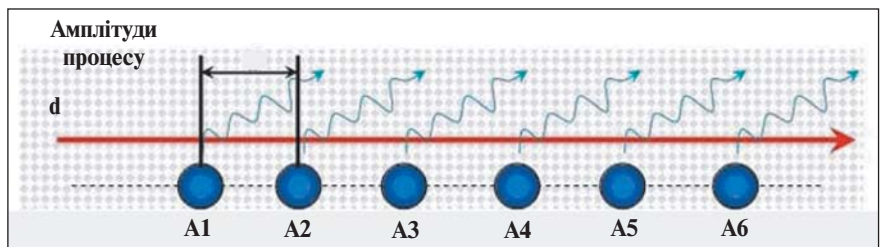
Бете і Гайтлер довели, що якщо довжина когерентності більша за характерні розміри атома, то поле атома повністю екранується, і розсіювання відбувається у послабленому полі. В іншому разі, коли довжина когерентності є малою порівняно з розмірами атома, екранування поля неістотно і на випромінюючий електрон впливає все кулонівське поле ядра.

Випромінювання електрона при його розсіюванні на одному атомі слабеє. Сильніші ефекти можна спостерігати при розсіюванні електрона на великих групах атомів. При цьому випромінювання електрона при його послідовних зіткненнях з атомами може як посилюватися, так і гаситися. На початку 1950-х років М. Тер-Мікаелян і Х. Юберал

показали, що при розсіюванні заряду на ланцюжку атомів з фіксованими відстанями між атомами (наприклад, на ланцюжку атомів кристала) завдяки когерентності полів випромінювання, що виникають при розсіюванні частинки, на окремих центрах розсіювання, гальмівне випромінювання значно посилюється порівняно з випромінюванням на окремих атомах. Цей інтерференційний ефект має місце, якщо довжина когерентності рівна або кратна відстані між атомами. Таким чином, тут має місце когерентне складання полів випромінювання електрона при його послідовних розсіюваннях на атомах, що отримало назву когерентного ефекту у випромінюванні. Завдяки цьому випромінювання стає досить потужним, що тепер знаходить широке застосування для отримання пучків фотонів, які використовуються для досліджень у галузі фізики елементарних частинок.



**Рис. 2.** Гальмівне випромінювання швидкого електрона при його розсіюванні у полі ядра атома речовини



**Рис. 3.** Когерентне складання хвиль, випромінених зарядженою частинкою при послідовних розсіюваннях на атомах ланцюжка кристала (М. Тер-Мікаелян, Х. Юберал).

У випадку, коли атоми розташовані хаотично, що, наприклад, має місце в аморфних середовищах, то отримати когерентність полів випромінювання при розсіюванні на окремих атомах середовища достатньо складно; в цьому разі інтерференція має деструктивний характер і призводить в основному до гасіння випромінювання.

1953 року *Лев Ландау* та *Ілля Померанчук* звернули увагу на те, що, завдяки багатократному розсіюванню на атомах середовища в межах довжини когерентності при русі швидко зарядженої частинки у товстому шарі аморфної речовини, її випромінювання при деяких умовах виявляється значно меншим за передбачуване теорією *Бете-Гайтлера*. Коректнішу математичну теорію ефекта на підставі використання методу кінетичного керування дав через рік *А. Мігдал*, і ефект у сучасній літературі отримав назву ефекту *Ландау-Померанчука-Мігдала* (ЛПМ). Явище виявилось доволі цікавим з того погляду, що в ньому при русі частинки у середовищі практично нема випромінювання у певній частині спектра, а саме: в ділянці малих випромінюваних частот, для яких довжина формування більша за характерну довжину вільного пробігу заряду у середовищі. Тому цей ефект виявляється істотним в експериментальних дослідженнях у фізиці високих енергій. Йому присвячено багато теоретичних робіт. Зокрема ЛПМ-ефект вивчався при дослідженні взаємодії жорстких гамма-квантів космічних променів з речовиною (придушення генерації електрон-позитронних пар фотонів у полі ядер). Проте перші детальні експерименти щодо ЛПМ-ефекту почали здійснювати лише через 40 років після його передбачення на прискорювачах в SLAC в середині 1990-х років і нещодавно в CERN. Результати експериментів повністю підтвердили висновки теорії.

З'ясування фізичних причин виникнення цього ефекту дозволяє зрозуміти багато особливостей процесів випромінювання швидких заряджених частинок, оскільки його природа криється в одному дуже цікавому фізичному явищі, яке супроводжує всі процеси випромінювання заряджених частинок.

Як зазначено вище, електрон — це частинка, навколо якої є електричне (кулонівське) поле. Це поле може поширюватися тільки з найбільшою можливою швидкістю, яка дорівнює швидкості світла і є скінченною. Тому при русі електрона кулонівське поле електрона перебудовується не миттєво, а тільки за певний час. Наприклад, якщо електрон різко змінює напрямок руху, кулонівське поле у початковому зникає не відразу. Аналогічно поле в напрямі нового руху електрона виникає також не відразу. Тому протягом деякого часу після розсіювання електрон перебуває у стані майже без свого кулонівського поля, хоча, зрозуміло, через певний час це поле в напрямку руху після розсіювання повністю відновлюється. Проміжний стан називають напівголим електроном, а першим його описав *Є. Фейнберг*, який вивчав особливості процесу випромінювання квантової релятивістської зарядженої частинки при її розсіюванні на атомах речовини з різкою зміною напрямку його руху; проте сам ефект, як було пізніше встановлено, має місце і в класичній теорії. Тепер виникає запитання: а як це позначається на характері випромінювання електрона при русі в аморфному середовищі?

Щоб зрозуміти суть справи, розглянемо електрон, що налітає на атом. Можна показати, що для релятивістського електрона еквіпотенціали кулонівського поля є сплюсненими еліпсоїдами.

При взаємодії електрона з атомом відбувається збурення цього поля, й після акту зіткнення це збурене поле відривається від електрона та перебудовується у випромінювання. Описаний процес має місце на довжині коге-

рентності, яка швидко зростає зі зростанням енергії електрона. Ця довжина може досягати макроскопічних розмірів, тому електрон може стикатися з великою кількістю атомів. Що ж при цьому буде?! Якщо у межах довжини когерентності існують інші взаємодії, то збурення буде збільшуватися, тобто випромінювання зростатиме. Чим більше число зіткнень, тим більше збурення. Але коли число зіткнень буде настільки великим, що усе поле виявиться збуреним, то при подальших зіткненнях додаткове збурення не відбуватиметься. Тому і випромінювання не збільшуватиметься. Іншими словами, число зіткнень з атомами зростатиме, а випромінювання не додаватиметься. У цьому, фактично, і полягає ефект Ландау-

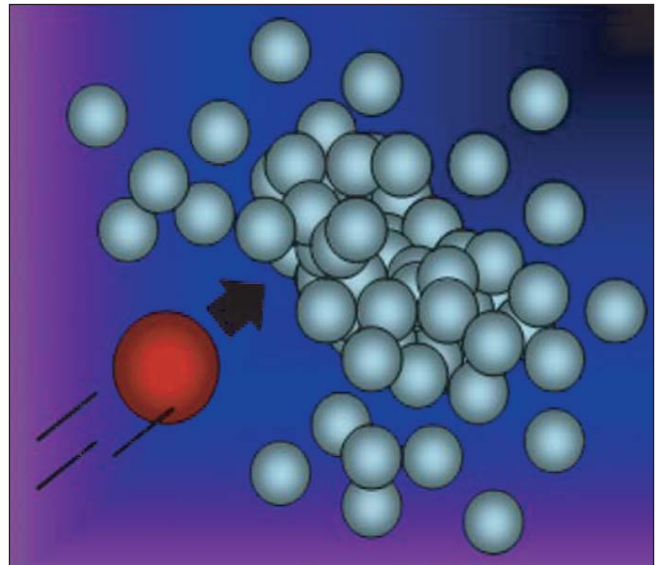


Рис. 4. Проходження заряду через аморфну речовину

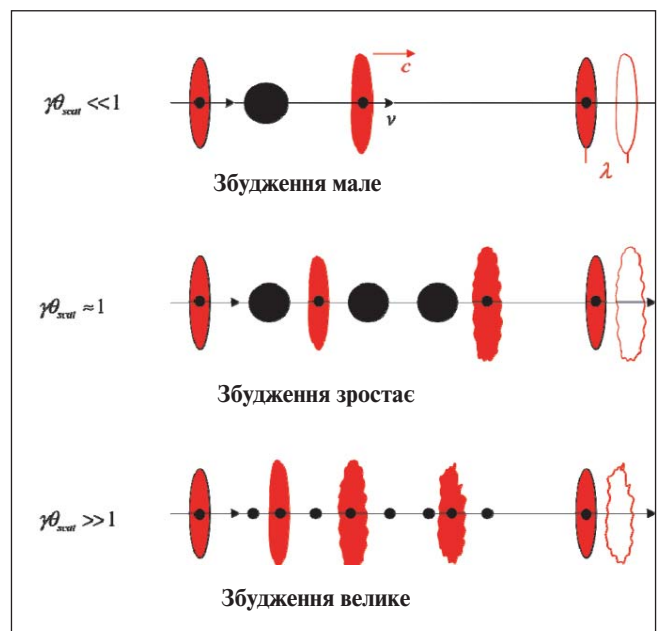


Рис. 5. Випромінювання електрона при зіткненнях із атомами речовини. Якщо число зіткнень на довжині когерентності мале, збудження поля електрона мале. Із ростом числа зіткнень збудження зростає, та зростає і випромінювання. Але якщо усе поле виявиться збудженим, то при подальших розсіюваннях електрона додаткового збудження поля не буде, та випромінювання додаватися також не буде. У цьому полягає ЛПМ-ефект та ефект пригнічення гальмівного випромінювання у тонкому шарі аморфної речовини.

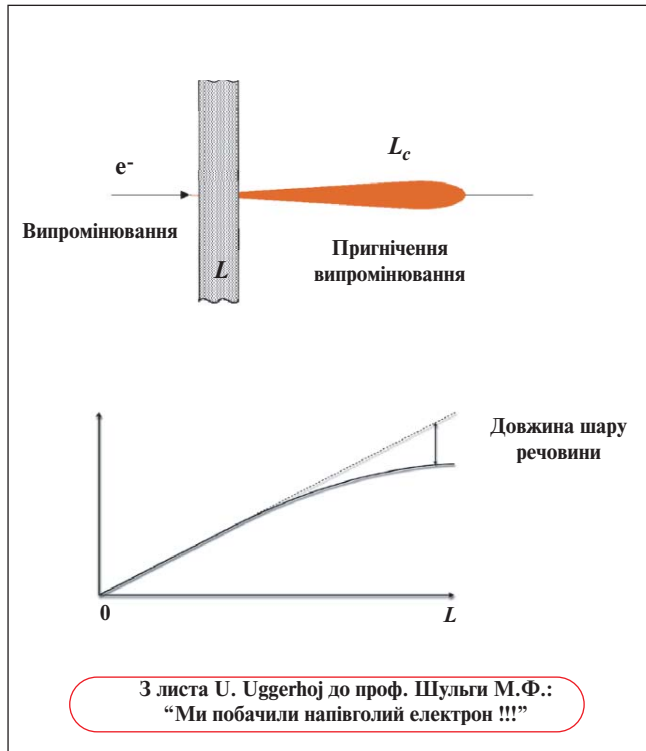


Рис. 6. Пригнічення гальмівного випромінювання швидкого електрона у тонкому шарі аморфної речовини (ТШФ-ефект), коли довжина когерентності (позначена червоним кольором) перевищує довжину мішені. На графіку відображено, що спочатку зі зростанням товщини мішені випромінювання пропорційно зростає, але при подальшому її збільшенні настає ефект пригнічення, а з додаванням додаткової речовини випромінювання не додається. Це пов'язано з існуванням напівголого стану електрона, коли його поле виявляється повністю збудженим. Ефект передбачено ще 30 років тому, але експериментальне дослідження виконано нещодавно (2009 р.)

*Померанчука-Мігдала.* Тут виникає ще одне цікаве запитання: що таке електрон?! Насамперед, це заряд, кулонівське поле, яке може збуджуватись. І електрон з таким полем може довго існувати. Водночас, прояви електрона зі збудженим полем можуть, як ми бачимо, істотно відрізнятися від проявів електрона із незбудженим полем!

Пізніше, наприкінці 1970-х років, у Харківському фізико-технічному інституті (ХФТІ) був передбачений аналогічний ефект придушення гальмівного випромінювання швидких заряджених частинок при їхньому русі через тонкий шар аморфної речовини. Він отримав назву *ефекту Тернівського-Шульги-Фоміна* (ТШФ). Придушення виникає при проходженні частинки через шар аморфної речовини для тих народжених фотонів, довжина формування яких більша за характерні поздовжні розміри мішені. Як виявилось, фізичні причини виникнення ефектів ЛПП та ТШФ схожі.

Слід зауважити, що хоча ефект ТШФ був передбачений ще 30 років тому, його детальне дослідження було виконано зовсім недавно, а саме: в травні 2009 року в CERN був поставлений експеримент NA63, в якому досліджувалася залежність випромінювання електронів великої енергії від товщини мішені при проходженні їх через шар аморфної речовини. Зокрема, були підтверджені прогнози, що стосуються випромінювання швидких електронів у тонкому шарі аморфної речовини. Також знайдено, що за деяких умов при збільшенні товщини мішені випромінювання не зростає. Цікаво відзначити, що керівник цього експерименту з радістю повідомив авторам ефекту: "*Ми побачили напівголий електрон!!!*"

Вище йшлося про випромінювання релятивістських зарядів при їхньому проходженні через речовину, коли випромінювання виникає завдяки прискореному руху при розсіюванні частинки на атомах середовища. Зрозуміло, що аналогічні ефекти повинні мати місце і в інших випадках — наприклад, при розсіюванні пучків заряджених частинок один на одному. Справді, через хаотичність розташування частинок, їх пучки можна розглядати як аналог аморфного середовища. Проте, можна відразу помітити, і це докорінно відрізняє цей випадок від описаного вище, що відмінною рисою таких процесів буде те, що при зіткненні пучків розсіювання відбувається не на екранованому потенціалі атомів середовища, а в далекосяжному кулонівському потенціалі частинок пучка. Поле заряджених частинок згустку простягається досить далеко, поперечні відстані, як виявилось, набагато більші за поздовжню довжину когерентності процесу випромінювання і можуть бути величезними. Наприклад, для електронів з енергією 50 MeV і випромінюваних фотонів з енергією 1 KeV довжина когерентності порядку сантиметра, але поперечні відстані виявляються порядку метра! Цей факт говорить про можливість виникнення абсолютно нових явищ у випромінюванні в розсіянні коротких і вузьких пучків частинок.

Звідки беруться такі величезні поперечні відстані? Це винятково релятивістський ефект, який пов'язаний з релятивістським стисненням еквіпотенціальних поверхонь кулонівського поля частинок вздовж напрямку руху в сплюснуті еліпсоїди. Зі збільшенням поперечної відстані ефективний поперечник такого еліпса може перевищити довжину когерентності процесу випромінювання, і ця межа визначає поперечні відстані, відповідальні за процес випромінювання.

На початку 1990-х років з'явилися роботи, в яких обговорювалася можливість когерентного ефекту у випромінюванні при розсіюванні пучків релятивістських заряджених часток один на одному, при якому інтенсивність випромінювання частинок пропорційна квадрату числа частинок у згустку. У сучасних експериментах на прискорювачах число частинок у згустку може досягати  $10^{10}$ , тому ефект посилення може виявитися величезним. Пов'язано це з тим, що поперечні та поздовжні відстані, відповідальні за процес випромінювання, можуть одночасно мати макроскопічні розміри. Відповідні розрахунки здійснюються на основі теорії збурень квантової електродинаміки. Як нещодавно було відзначено, такий розгляд при достатньо великому числі часток виявляється неправомірним, оскільки виявляється можливим досліджувати процес випромінювання в рамках набагато простішої класичної теорії випромінювання. Така теорія була розвинута вченими ХФТІ.

Завдяки далекосяжності потенціалу у цьому разі вже не обов'язково, щоб пучки перетиналися. Для виникнення випромінювання вони можуть проходити один повз одного на деякій відстані, що зветься прицільною. Особливий інтерес становить випадок, коли довжина когерентності більша за поздовжні розміри згустків. Далекосіяжність у цьому випадку виявляється у тому, що в розсіянні зарядів одного згустку на частинках іншого є сильні кореляції та повний кут розсіювання заряду (який визначає інтенсивність випромінювання) пропорційний повному числу частинок у згустку, що налітає. В цьому випадку при випромінюванні малих частот також виявляється можливим когерентний ефект. Наприклад, якщо енергія електрона близько 5 GeV, довжина і характерний поперечний розмір згустку порядку 0.1 см і 0.01 см, відповідно, то когерентний ефект має місце для фотонів з енергією 50 KeV і менше.

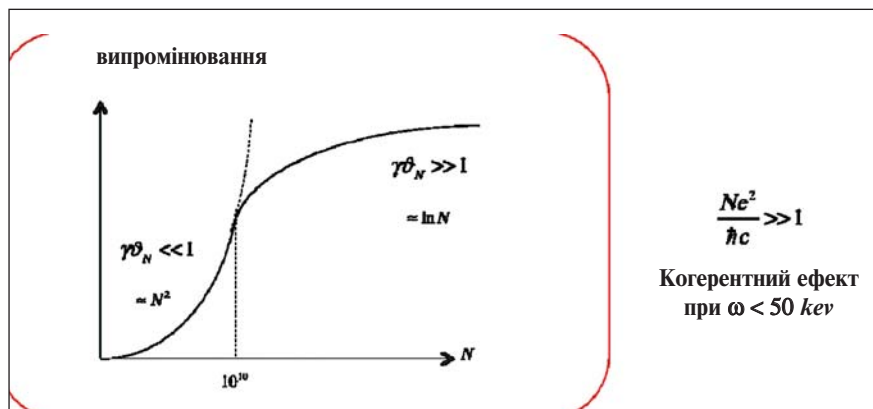


Рис. 7. Залежність випромінювання релятивістського електрона при розсіюванні його на налітаючому згустку швидких частинок від числа частинок у згустку. При малому числі частинок на довжині когерентності має місце когерентний ефект (квадратична залежність від числа частинок), але із ростом їх числа настає ефект пригнічення когерентного випромінювання (логірифімічна залежність)

Звичайно ж, теоретичні пошуки без практичного застосування становлять незначний інтерес. У майбутньому, можливо, знайдеться досить багато можливостей застосування зазначених ефектів, проте вже зараз вдалося знайти можливий напрямок застосування. Він заснований на тому, що зі зменшенням відстані між осями згустків, що зіштовхуються у випромінюванні, виникає різкий максимум на відстанях порядку поперечних розмірів згустків. Цей факт дозволив запропонувати новий метод моніторингу пучків заряджених частинок, який полягає у тому, що при зведенні пучків один до одного випромінювання спочатку зростає, але потім різко падає практично до нуля, коли осі пучків збігаються. Ця ідея зараз інтенсивно розвивається.

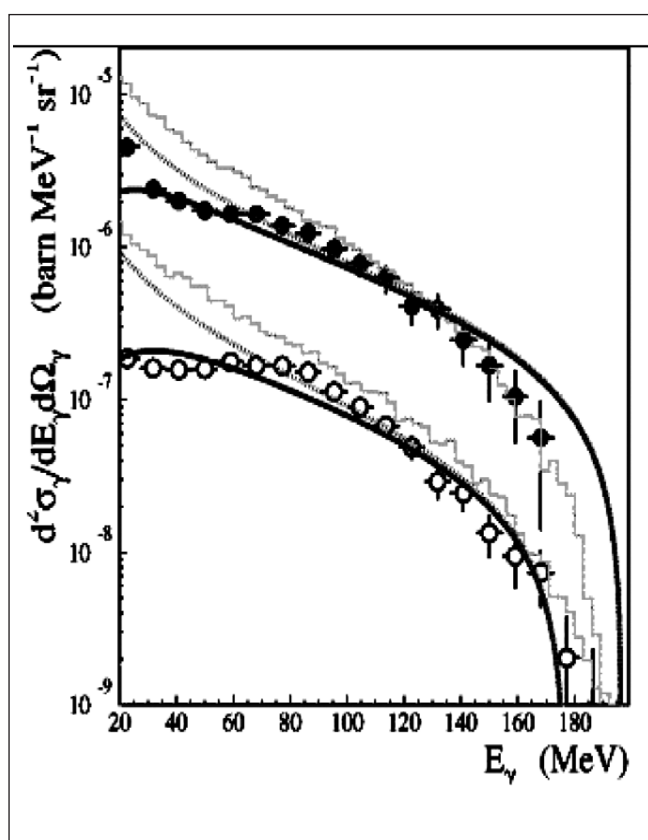


Рис.8. Спектр гальмінового випромінювання при бомбардуванні протонами золотої (чорні точки) та вуглецевої мішеней (кружки). Сіра гістограма — розрахунок за моделлю ядерних каскадів (при нехтуванні інтерференційними ефектами)

Таким чином, вивчення ЛПМ-ефекту і його аналогів дозволило зрозуміти багато особливостей процесів випромінювання. Всі описані явища виявляються важливими, зокрема, при проведенні експериментів у фізиці елементарних частинок при високих енергіях. Ці ефекти важливі і з фундаментальної точки зору, особливо принциповим є вивчення аналогів ЛПМ-ефекту. Найближчим часом заплановано вивчення аналогів ЛПМ-ефекту в кварк-глюонній плазмі в експерименті "Аліса" в CERN. Для детального вивчення описаних ефектів у випромінюванні заплановано також проведення спеціальних експериментів на прискорювачах елементарних частинок у Німеччині, Італії, США. Теоретично розглядали аналоги ЛПМ-ефекту для випадку ядерних зіткнень (придушення випускання м'яких фотонів), для випадку нуклон-нуклонних зіткнень (придушення випускання м'яких нейтрино). У 2002 році група вчених з Гронінгена провела експериментальні дослідження придушення гальмінового випромінювання протонів з енергією 190 MeV при їх зіткненні з ядрами твердотільних мішеней із золота, срібла, нікелю та вуглецю, що дозволяє розширити фронт пошуків нових ефектів.

Отже, інтерференційні ефекти мають грати роль при випромінюванні фотонів з довжиною формування більш за довжину вільного пробігу, що відповідає енергіям, меншим 90 MeV. Приємно, що експериментальні результати досить добре підтвердили теоретичні прогнози, сформульовані у ХФТІ.

У навколишньому світі є величезна різноманітність фізичних явищ, і спробувати зрозуміти кожне з них незалежно виявляється практично неможливим. Проте краса усього цього розмаїття якраз і полягає в тому, що, здавалося б, є абсолютно різні явища, аналогічні чи ті, що мають схожі або однакові механізми, і досконало вивчивши якесь одне явище, виявиться можливим відразу робити висновки і стосовно багатьох інших, аналогічних явищ. І можливо, в майбутньому вивчення подібних явищ допоможе глибше зрозуміти будову фізичного світу, в якому ми живемо.

До речі, не варто плутати описаний когерентний ефект з випромінюванням лазерів. В останніх когерентно випромінює велика кількість частинок, а в нашому ефекті випромінює тільки одна частинка при розсіюванні в полі інших. Звичайно ж, при розсіюванні двох згустків частинок один на одному кожна заряджена частинка одного згустку випромінює при розсіюванні на зарядах іншого згустку, проте, завдяки хаотичності розташування частинок у згустку і незалежності випромінювання різних частинок, випромінювання саме по собі некогерентне. Тому когерентного ефекту у випромінюванні різними зарядами одного і того ж згустку немає.