Незвичайність предмета, про який піде мова, змушує почати здалеку — від того періоду в історії Землі, коли вперше з'явилася загроза гігантським ящерам. Цією загрозливою силою були дивні теплокровні істоти, які злякано ховалися по кущах при самій тільки появі динозаврів.

Однак з роками теплокровні росли й міцніли, а славне плем'я ящерів-велетнів дрібнішало й вимирало. Зараз тільки за гордим поворотом голови та загальними обрисами тіла можна пізнати в жалюгідних ящірках і гекконах їхніх великих предків. А втім, природі не властива нудна прямолінійність. Поступившись силою, втративши велич, далекі потомки прадавніх рептилій умудрились перетворити на недоліки головну перевагу своїх переможців. Щитомордники, гримучі змії і багато інших плазунів навчились уловлювати невидимі теплові промені, які мимоволі випускають їхні переможці, і в такий спосіб дістали можливість атакувати свої жертви у темних норах, під покривом ночі, коли все живе безпомічне. Вражаючий приклад того, як силу ворогів можна перетворити на слабкість!

Слід відзначити: теплокровні й досі не знайшли що протиставити шостому почуттю плазунів — теплобаченню. І навіть тоді, коли людина побудувала всілякі тепловізори, створивши прилади для інфрачервоного бачення в цілковитій темряві, це, по суті, було лише повторенням патента природи. Люди використали «винахід» плазунів, відшліфований мільйонами років нелегкої еволюції.

Все це мимоволі спало на думку, коли у відділі плазмених явищ у напівпровідниках Інституту напівпровідників АН УРСР професор Володимир Костянтинович Малютенко показав зовні нічим не примітний прилад: лінзочка в дюралевому футлярі та дві клеми із зворотного боку. Ось і вся технічна премудрість. Але ж коли на клеми цієї лампочки був поданий електричний імпульс, вона не спалахнула яскравим світлом, як це буває звичайно, а навпаки, перестала випромінювати будь-що, як належить тілу, нагрітому до певної температури.

Сталося абсолютно неймовірне — серед звичайних предметів утворилася якась «чорна діра», про що досі можна було прочитати хіба у фантастів та в деяких астрономів, які займаються дослідженням далекого космосу. Легко уявити собі здивування гримучої змії, яка звикла покладатися на своє безвідмовне шосте почуття, якби їй довелось зіткнутися з чимось подібним — предмети раптом перед її проникливим поглядом зникали б...

А втім, особливо хвилюватися з цього приводу не слід — предмети з поля зору зникають не назавжди. Варто прибрати електричний імпульс і «лампочка-навпаки» знову повернеться до свого природного стану. Вона стане звичайним предметом, який нічим не виділяється з-поміж інших.

Дивні перетворення «лампочки-навпаки» ще не так давно загнали б у кут навіть учених, які звикли нічому не дивуватися. Адже й сьогодні тільки вузьке коло спеціалістів знає про негативну люмінесценцію, що є причиною появи серед звичайних предметів «чорних дір» на замовлення.

Називати звичайну люмінесценцію позитивною, чи люмінесценцію з плюсом, знадобилось тоді, коли дослідники відкрили, що в цього явища є антипод. Зберігаючи спільну схожість зі своїм старшим родичем, що вивчається вже понад століття, він проте є його своєрідним дзеркальним відображенням і несе в собі мінус. Але про дзеркальне відображення трохи пізніше. Збережемо належний етикет і почнемо знайомство за старшинством.

Про позитивну люмінесценцію сьогодні знає, мабуть, кожен. Хто не милувався сяючим в теплу літню ніч світлячками чи зеленкуватими вогниками в морі, які розцвічують хвилі. На Далекому Сході під час вилову горбуші можна спостерігати ще більш вражаюче видовище — тарілка зі свіжою кетовою ікрою світиться, хоч читай при ній.

Ну, і як не згадати тут «Собаку Баскервілів», у якій злочинці так блискуче використали люмінесцентну фарбу? Правда, трохи менш відомо, що свічення деяких мінералів і навіть Північне сяйво також мають пряме відношення до тієї ж таки люмінісценції.

Із технічних застосувань цього явища найбільш відомі різні варіанти світлових панелей. Уже не дивують незвичайністю плоскі телевізійні екрани, де використана здатність деяких речовин світитись під впливом електромагнітного поля. До всіх цих пристроїв сьогодні додалися системи обробки інформації, різноманітні оптоелектричні пристрої — підсилювачі випромінювання тощо. Неможливо обійти увагою й те, що в основі роботи лазера лежать ті самі принципи позитивної люмінесценції.

Вражаюча невичерпність напрямку! Він дарує техніці винаходи, один дивовижніший іншого. І хай не всі вони ведуть до гучних технічних звершень, але всі, проте, надійно і послідовно збагачують техніку, Щоб повною мірою оцінити дотепність учених, котрі від скромного свічення світлячків і старих пнів проклали дорогу до каскаду блискучих досягнень сучасної техніки, нам доведеться зануритись у глибини квантової механіки. Без допомоги цієї непростої науки не розібратися в хитромудрих процесах, які призводять до того, що з кристалу, газу чи рідини раптом починає струменіти якесь випромінювання, що дістало назву люмінесценція. Або, навпаки, тіло начебто зовсім зникає з навколишнього світу, засвідчуючи, що все в цьому світі діалектично пов'язане, що у будь-якого прямого фізичного процесу і є зворотний. Але висновки потім. Зараз спробуємо розібратися в тому, що відбувається у мікросвіті речовини, коли вона починає поводитись так дивно.

**ПРО РІВНОВАГУ І ЇЇ ПОРУШЕННЯ**

Квантова механіка базується на тому сьогодні вже загальноприйнятому уявленні, що енергія в будь-якій системі змінюється не безперервно, а стрибком, і тому набуває лише певних значень. Навмисне не будемо сковувати себе чітким визначенням слова «система» — це може бути і один атом чи молекула або ж газ, кристал, крапля рідини, що являють собою цілі ансамблі частинок. Головне для нас зараз — підтвердити факт, що перехід такої системи з одного енергетичного стану в інший відбувається стрибком. При цьому виділяється чи поглинається порція (квант) енергії.

Тепер візьмемо термостат, стінки якого утримують певну температуру, і помістимо в нього нашу систему. Залишається почекати поки потік енергії, що падає на тіло, дорівнюватиме тому, що виділяється, і ми зможемо визначити потужність рівноважного випромінювання в заданому спектральному діапазоні. Знаючи цю величину, неважно вимірювати величину люмінесценції.

Звичайно, поки рівновага в нашій системі не порушена, про люмінесценцію годі говорити. Але якщо в систему надходить додаткова енергія, рівновага порушується. При цьому кількість переходів частинок з основного стану відразу ж зростає. А поява надлишку частинок у збудженому стані збільшує число зворотних переходів. Одразу ж виникає сумарна потужність випромінення на заданій частоті, яку ми зареєструємо у вигляді люмінесценції — явище, яке свідчить про те, що в даному тілі з'явився надмір випромінення над тепловим, тобто рівновагу порушено.

Достоїнством цього феномена є те, що практично в усіх цікавих випадках люмінесценцію можна виявити дуже просто — це явище помітне. Ось тому люмінесценція стала дуже важливим інструментом дослідження нерівноважного стану речовини. Причому зовсім не важливо, який спосіб збудження системи при цьому використаний — чи то світлові хвилі, чи проникаюча радіація, хімічні реакції чи електричне поле, процеси життя чи механічна дія — незалежно від способу приведення частинок у такий збуджений стан потужність випромінення системи збільшується, іноді досягаючи величезних розмірів. Згадаємо ще раз приклад з лазером.

Усі ці особливості люмінесценції призвели до того, що вона з цілком другорядного процесу, який явно не лежить на головній магістралі розвитку науки, перетворилась на могутній інструмент вивчення щонайтонших явищ, які відбуваються в глибинах матерії. З її допомогою стало можливим досліджувати просторове розташування структури молекул, процеси перетворення і переносу енергії, енергетичну структуру речовин. Це дало змогу застосовувати її методи в ядерній фізиці, хімії, геології. її поспішили використати біологи і біофізики при вивченні найтонших процесів життя. Нарешті, люмінесценція знайшла застосування в космічних дослідженнях...

І все ж на сьогоднішній день — це вже класика науки. Тут важко чекати революції. Несподіване почалось, коли вчені поставили задачу, так би мовити, з ніг на голову — коли вони поставили собі питання: а чи не можна одержати люмінесценцію з мінусом?

Коли глянути на задачу про негативну люмінесценцію з висоти нинішніх досягнень, може здатися, що ця ідея не така вже й складна. Правда, саме про задачі прості вже не один дослідник говорив, що розв'язати їх — справа надзвичайно важка. Можливо, саме тут лежить пояснення того дивного для сучасної науки факту, що на початковому етапі негативна люмінесценція розроблялася без будь-якої видимої конкуренції. Це тим більш дивно, що на всіх найголовніших напрямках науки зараз робиться таке, що часто-густо важко назвати єдиного автора ідеї: до рішення її одночасно приходять численні групи вчених у різних країнах.

А тут усі події розвивалися ідилічно спокійно. Всі попередні дослідження були проведені тільки в нашій країні.

Вперше вийшов на негативну люмінесценцію відомий оптик з Мінська, представник знаменитої фізичної школи Сергія Вавілова, академік АН Білоруської РСР Борис Степанов. Сталося це років тридцять тому, коли у фізиці інтенсивно обговорювалась задача, яка нібито й не має прямого відношення до нашої теми — про можливість пояснення квантового виходу люмінесценції більшої за одиницю. Борис Іванович, розглядаючи з колегами схему переходу, відкрив, що серед членів, які обумовлюють випромінювальні переходи, з'явився один з від'ємним знаком. Все це і дало авторам привід буквально на рівному місці передбачити явище, яке ні з якого експерименту не випливало.

Давайте й ми простежимо за тим, що станеться, коли енергія, яка підводиться ззовні, витрачається не на збільшення (що давно і добре досліджено), а на зменшення «заселеності» збудженого рівня.

Звичайно, простіш усього було б заборонити частинкам переходи вгору. Однак у світі, що підлягає квантовим законам, такі заборони неможливі. Частинки їм просто не підкоряються, оскільки їх поведінка регулюється тільки температурою і характером речовини, в якій усе це відбувається. Так що для здійснення цієї простої ідеї потрібні були б якісь інші, тонші засоби. Тому було вирішено якимсь чином вилучити частинки зі збудженого стану.

Якби цей вивід частинок вдалося реалізувати, то кількість їх переходів назад скоротилася б і відповідно потужність свічення тіла на даній частоті зменшилась би. Ми вже могли переконатися, що позитивна люмінесценція у простій дворівневій системі реалізується досить легко. Однак здійснимі негативну люмінесценцію в такій ізольованій системі з двома рівнями не можна. Ситуація докорінно зміниться, якщо ввести в систему третій рівень. Тепер можна підводити енергію так, що частинки не будуть повертатися на нижній, основний, а почнуть переходити на додатковий, третій рівень. Наслідком цього нового процесу буде виснаження верхнього рівня і, відповідно, зменшення числа переходів за одиницю часу на початковий рівень. Таким чином, випромінюваний спектр зміниться — в ньому з'являться нові частоти, які відповідають переходу частинок з третього рівня на перший і з третього на другий. А переходи з другого на перший рівень істотно зменшаться, що буде сприйнято зовнішнім спостерігачем як поява на цій частоті деякого провалу — негативної люмінесценції. Так із чисто теоретичних передумов ми приходимо до опису нового фізичного феномена, при якому випромінення тіла повинне не збільшуватись, а зменшуватись порівняно з рівноважним тепловим. Приблизно такий хід міркувань привів у 1955 році співробітників двох інститутів — Фізико-технічного Білоруської Академії наук у Мінську, де працював Б. Степанов, і Фізичного імені О. Лєбедєва АН СРСР у Москві — до створення теоретичної моделі люмінесценції з мінусом. Сьогодні бачимо, що гіпотетична трирівнева модель мало наближається до тієї реальної ситуації, яка відкрита наступними дослідженнями. І все-таки дуже важливий крок був зроблений. Явище було в принципі передбачене, хоча жоден експериментатор, як кажуть, у вічі його не побачив. Якось вийшло так, що ця пріоритетна робота випередила свій час і не привернула уваги, на яку заслуговувала.

Минули десятиліття. Події, яким суджено було вивести другу групу вчених на відкриття люмінесценції, розгорнулися в Інституті напівпровідників АН УРСР. Тут у сімдесят шостому році був організований зовсім незвичайний відділ — Відділ плазмених явищ у напівпровідниках, який очолив молодий дослідник Володимир Костянтинович Малютенко. Незвичайність тематики відділу полягає в тому, що досі фізики займалися дослідженням напівпровідникових кристалів. А київські вчені запропонували розглядати кристал лише як резервуар, сховище плазми і досліджувати не резервуар, а оце примхливе мінливе середовище, Незайве відзначити, що для фізика ніякої різниці між усілякими видами плазм немає. Плазма дуги, блискавки, чи зоряна, плазма в термоядерній установці, чи в твердому тілі — скрізь це буде одне й те саме динамічне середовище. Зараз нікому не цікаві явища в стаціонарі чи, скажімо, в рівноважному стані. За таких спокійних умов із системи не витягнеш ніякої незвичайної інформації. Потрібно її збурити, привести в нерівноважний стан — і ось тоді тільки встигай задавати питання і ловити відповіді про характер електронних переходів, про квантову структуру речовини. З другого боку, будь-які практичні використання пов'язані саме з нерівноважністю.

Ось як підійшли до вивчення явищ у напівпровідниках київські фізики. Можна сказати, що вони затягували невід з такими дрібними вічками, крізь які вже ніяк не могло проскочити нове явище. І справді, незабаром саме дослідження параметрів напівпровідникової плазми привело вчених до відкриття негативної люмінесценції. Вивчення явища можна провести тепер у будь-якій лабораторії, користуючись при цьому досить обмеженим набором стандартних оптичних і електронних приладів. Кожен, хто знайомиться з люмінесценцією з мінусом, вигукує: «Ой, як просто. Ну, чому ж це ми до цього не додумались!..» Що ж, це ознака серйозного результату.

Реально для виготовлення приладу із сильною негативною люмінесценцією потрібна що найтонша пластинка чи просто напилений шар чистого напівпровідника. Не треба ніяких багатошарових структур, р — п-переходу й інших чудес. До цього шару напівпровідника припаюється звичайний омічний контакт. Тепер залишається помістити напівпровідник з контактами в магнітне поле, до речі, теж досить малопотужне — близько тисячі ерстед. Ось і все. Прилад-невидимка готовий. Оскільки електричне і магнітне поля схрещені, хмаринка плазми в напівпровідниковому каркасі кидається від грані до грані залежно від напрямків полів. Грань, з якої спостерігається випромінення, може збагачуватись носіями струму. В цьому випадку число переходів електронів униз із випромінюванням збільшується, і приймач випромінювання фіксує зростання інтенсивності свічення кристалу. На екрані осцилографа висвічується позитивний імпульс. Це добре вивчений випадок так званої інжекційної люмінесценції напівпровідників. За цим принципом працюють напівпровідникові світлодіоди і лазери.

Може реалізуватися інше — всі носії струму йдуть до задньої грані, на якій спеціальною обробкою створені умови для їхньої рекомбінації без випромінювання. У цьому випадку досліджувана область виснажується, кількість переходів електронів униз зменшується, падає потік рекомбінаційного випромінювання. На екрані осцилографа виникає негативний імпульс.

Амплітуду імпульсу негативної люмінесценції можна збільшити. Для цього достатньо збільшити керуючі поля. Стан насичення відповідає ситуації, коли випромінювання кристала в спектральній області міжзонних переходів повністю припиняється. Після закінчення дії імпульсу напруги потужність випромінювання кристала поступово повертається до рівноважного значення. Прикладання наступного електричного імпульсу знову приводить в рух ті ж сили, і все повторюється.

Негативну люмінесценцію вдалося детально вивчити в Німеччині, антимоніді індію, у сполуках типу кадмій-ртуть-телур і багатьох інших напівпровідниках. І хоча на початку шляху київські дослідники працювали в цілковитій самотності, зараз до них приєднуються все нові й нові групи.

Перші повідомлення про спостереження явища за рубежем з'явилися у пресі 1981 року у ФРН — через два роки після першої роботи київських фізиків.

Ще через два роки до цієї тематики приступили японські дослідники і відразу ж розгорнули роботи досить широко. Потім негативною люмінесценцією зайнялися американські дослідники в Берклі в Каліфорнії.

Від фундаментальних досліджень досить швидко вдалося перейти до практичних розробок і навіть до впровадження в практику. Давно з'ясовано: чим сміливіший пошук вчених, тим до неординарніших технічних рішень він приводить. Мірилом фундаментальності досліджень нерідко може служити широта і принципова новизна практичних застосувань. За цими мірками негативна люмінесценція заслуговує найвищої атестації — вона вже заявила про себе багатьма вражаючими рішеннями.

Одними з перших використати спокусливі можливості відкриття взялися в ужгородському об'єднанні «Закарпатприлад». Конструктори безстрашно почали перетворювати фізичну ідею на реальну конструкцію. Тут в СКТБ засобів аналітичної техніки був створений прилад, який можна назвати «лампочкою-навпаки».

Зовні лампочка нібито нічим особливим не відзначається від тисяч варіантів освітлювальних приладів. Прилад як прилад. Та й деталей всього-на-всього: лінзочка, взята в дюралеву оправу, і дві клеми з тилового боку. Якщо заглянути під лінзочку, там теж нічого особливого не побачиш — крихітна пластиночка напівпровідника між двома магнітиками розміром з сірникову голівку. Однак, коли на клеми лампочки подається електричний імпульс, вона перетворюється на... чорну діру, яка перестає випромінювати теплові промені.

Такій «лампочці-навпаки» вже придумано немало застосувань. Конструктори з Ужгорода відразу побачили, що її легко вмонтувати в апаратуру для тонкого газового аналізу, використати для розробки надійних пристроїв, що сигналізують, наприклад, про найменші кількості шкідливих газів у повітрі.

Скажімо, ми збираємось настроїти прилад на уловлювання метану в шахті. Візьмемо для цього випромінювач, який посилає сигнали в ІЧ-діапазоні хвилі тієї довжини, яку краще всього поглинає метан, і розташуємо на деякій відстані від приймача, що приймає ту ж довжину хвилі.

Далі події в шахті розгорнуться так. Поки метану в повітрі немає, приймач спокійно приймає сигнали і мовчить. Але варто з'явитися метану, як приймач відразу ж перестає «бачити» сигнали і сповіщає про появу в шахті газу.

Сигналізація, побудована на цьому принципі, досить оригінальна і дуже надійна. Ніде в світі ніхто нічого подібного ні за конструкцією, ні за можливостями не випускає.

Після створення «лампочки-навпаки» дослідники взялися розробляти і «рефлектор-навпаки», тобто такий прилад, який не обігрівав би, а, навпаки, відкачував теплоту на себе — охолоджував на відстані. На думку, що такий прилад в принципі можливий, наводить досить просте міркування.

Візьмемо, . наприклад, два тіла, між якими немає ніякого обміну, крім випромінення, і помістимо у вакуум, Випромінення призводить до того, що між тілами зрештою установлюється рівновага, (хні температури вирівнюються. Тепер уявімо, що одне з тіл, завдяки негативній люмінесценції, перестало випромінювати, а тільки поглинає промені. Друге тіло, віддаючи тепло через випромінення і нічого не одержуючи натомість, починає охолоджуватись. Ось і виходить, що перше тіло через негативну люмінесценцію працює як антирефлєктор, рефлектор-навпаки, який висмоктує тепло з навколишніх тіл, охолоджує їх на відстані. Виявилось, що, незважаючи на всю свою фантастичність, вона становить неабиякий інтерес для практики, її можна використати для охолодження мініатюрних деталей, елементів електроніки. Такого роду холодильники будуть незамінні там, де не вдається одержати контакт для безпосереднього охолодження, де не можна відкачати тепло в результаті обігу навколо охолоджуваного тіла холодоагента. Тут відкачування буде проводитись на відстані.

Чого слід сподіватися від негативної люмінесценції? Насамперед, згадаємо, що звичайна чи позитивна люмінесценція подарувала приладобудуванню могутній дослідницький метод — люмінесцентний аналіз. Де тільки не зустрінеш сьогодні прилади, побудовані на цьому принципі.

Є серйозні підстави вважати, що у негативної люмінесценції здібності не менші. Вона може, скажімо, прислужитися у дослідженні метрики, тобто квантової структури речовини. Не дивно, що першими намагалися використати можливості нового напряму у себе в лабораторіях самі фізики-експериментатори. З допомогою нового явища київським фізикам вдалося виміряти такі властивості напівпровідників, які ще недавно не піддавались точній кількісній оцінці. Негативна люмінесценція дала змогу визначити найважливіші параметри напівпровідників: час життя і швидкість поверхневої рекомбінації носіїв струму, їхню рухливість і коефіцієнт дифузії. Досить просто, порівняно з існуючими методами, визначається ширина забороненої зони матеріалу, легко простежується залежність цього параметра від зовнішніх факторів: тиску, електричного й магнітного полів тощо.

У зв'язку з тим, що негативна люмінесценція може бути викликана різними зовнішніми причинами: температурою, тиском, магнітним полем тощо, це явище використовується для створення нових датчиків, чи сенсорів, як зараз прийнято говорити. Вже створені оптоелектричні датчики температури, магнітного поля, тиску. Новизна технічних рішень усіх цих приладів не викликає сумнівів — київські фізики одержали авторські свідоцтва, які стверджують їх пріоритет.

«Втім, все це лише початок,— вважає професор В. Малютенко. — Дослідження, які зараз розгортаються в Інституті напівпровідників АН УРСР, дають підстави сподіватися, що будуть знайдені нові ефективні способи збудження негативної люмінесценції у твердих тілах, які різко розширюють сферу її застосування. Немає принципових обмежень на існування цього явища у металах, рідинах. Значний інтерес являють собою дослідження у газах при вивченні спектрів молекул і атомів».

Не виключено, як показують дослідження в різних країнах, що вивчення негативної люмінесценції буде корисним при розшифровці складних і недостатньо вивчених спектрів збуджених станів молекул і молекулярних комплексів. Заділ уже є — американським дослідникам вдалося знайти негативну люмінесценцію при оптичному накачуванні газів С02 і N02.

«Виявлення негативної люмінесценції слід чекати при хімічних реакціях,— вважають учені з Інституту напівпровідників АН УРСР.— Воно можливе також у біологічних об'єктах». Не будемо захоплено фантазувати на таку вдячну тему, підказану вченими, краще звернемо увагу на ту обставину, що це явище може зіграти неабияку роль і при дослідженні далекого космосу. Вже знайдені джерела в космосі, температура яких виявилась нижчою від температури реліктового випромінювання. Коли підтвердиться, що це явище пов'язане з негативною люмінесценцією, вдасться одержати відомості про дуже важливі процеси, що відбуваються у Всесвіті, ближче познайомитись з матеріалом, з якого складається міжзоряний простір.

Ось яким каскадом винаходів і нових надій обернулася спроба вчених поставити звичне, давно всім відоме явище «з ніг на голову». Але ж на початку спроба не провіщала ніяких особливих перспектив. Та не минуло й десяти літ після відкриття, як перед технікою відкрились досить заманливі горизонти. Можна назвати немало підприємств, які з інтересом придивляються до нових можливостей. Нічого не скажеш — у відкриття щаслива доля. І все-таки крапку в цій оповіді ставити не можна.

Так, справді, наші вчені володіють сьогодні очевидною перевагою в розробці цієї теми — більша половина всіх публікацій, авторські ідеї належать радянським ученим. Пріоритет радянської науки на цьому напрямі ніким не заперечується. Але все ж темпи, з якими західні лабораторії почали нарощувати дослідження з цих питань в останні роки, інтерес електронних фірм свідчить про те, що лідерство можна легко втратити. Настав час якомога швидше переходити від фундаментальних досліджень до якнайширшого впровадження. Зрозуміло, що силами академічного інституту довести ідею до промислового впровадження.