

TERRA INCOGNITA ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СПЕКТРУ

— І навіть потрібні ці Ваші електромагнітні хвилі, пане Максвелл?

— Не знаю, можливо, колись на основі цих хвиль робитимуть іграшки.

3 наукової дискусії¹

Теорія електромагнітних хвиль, розроблена видатним англійським фізиком Джеймсом Клерком Максвеллом (1831-1879) у 2-ій половині XIX ст., дозволила в однаковий спосіб підійти до опису радіохвиль, світла, рентгенівських променів і гамма-випромінювання. Виявилось, що це не випромінювання різної природи, а електромагнітні хвилі з різною довжиною хвилі. Частота ν коливань електричного і магнітного полів пов'язана з довжиною хвилі λ співвідношенням: $\nu = c / \lambda$, де c — швидкість світла. Радіохвилі, інфрачервоне, видиме і ультрафіолетове світло, рентгенівські промені і гамма-випромінювання знаходять своє

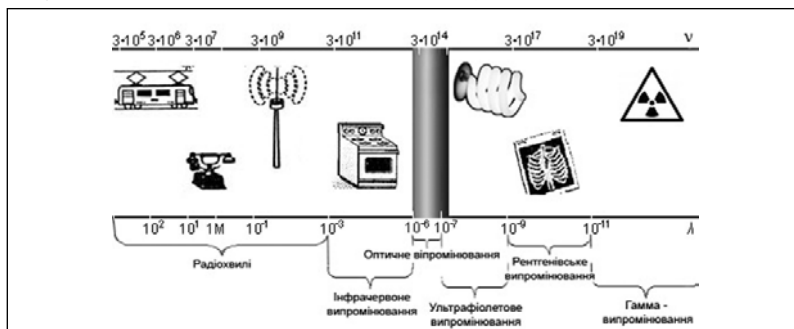
місце в єдиній шкалі (спектрі) електромагнітних хвиль (рис.1). Хоча вони й мають спільну природу, але характеризуються різними способами збудження та реєстрації, по-різному взаємодіють з речовиною.

Освоєння спектру частот електромагнітних коливань відбувалося поступово: відкривалися і удосконалювалися джерела і приймачі випромінювань, розроблялися засоби управління і передачі, з'ясовувалися можливості практичного застосування. Кожен спектральний діапазон має свою історію, своїх першовідкривачів, свої сфери застосування. В різний час, залежно від успіхів або невдач винахідників та учених, одним ділянкам спектру приділялося більше уваги, іншим — менше.

ють від 1 до 10 мм. Відповідний діапазон частот (30×300 ГГц) називають *гранично високими частотами* — ГВЧ. Ця ділянка довгий час залишалася слабо освоєною, і ще в середині 20 століття багато учених називали її «*terra incognita*» — невідомою землею електромагнітного спектру.

Втім, зовсім без уваги міліметрові хвилі не залишалися ніколи. Ще на зорі радіотехніки, на початку 20 століття було винайдено пристрої, що дозволяли генерувати електромагнітні коливання з широким спектром, що включав і міліметрові хвилі.

Видатного успіху в дослідженні електромагнітних хвиль досяг російський фізик **Петро Миколайович Лебедев** (1866-1912). У 1895 р. він отримав за



Мал. 1 Шкала електромагнітних хвиль : вгорі показана частота в Герцах, внизу — довжина хвилі в метрах

¹ Діалог, який нібито відбувся між Максвеллом та одним зі членів Королівського товариства, незважаючи на відсутність документального підтвердження, є цілком вірогідним. Відомо, що англійський вчений у дитинстві був оточений різноманітними «науковими іграшками» (наприклад, «магічним диском» — попередником кінематографа, моделлю небесної сфери, дзигною-«дияволом» тощо). Це зіграло важливу роль для вибору майбутньої професії.

Ближче до початку спектру — між радіохвилями і інфрачервоним випромінюванням — розташована дуже цікава ділянка, яка дістала назву *міліметровий діапазон*, оскільки в його межах довжини хвиль у вакуумі склада-

допомогою вдосконаленого вібратора Герца хвилі завдовжки 6 мм, які, як сам він писав «...були ближчі до довших хвиль теплового спектру, ніж до електричних хвиль, якими спочатку користувався Герц». З такими хви-

лями Лебедев отримав усі «оптичні» явища — інтерференцію, поляризацію, відбивання, заломлення і навіть подвійне заломлення в призмі, яку було вирізано з кристалічної сірки. Усі пристрої і пристосування, власноручно зроблені Лебедевим для цих дослідів, є чудовим зразком експериментального мистецтва свого часу (мал. 2).

Подальші дослідження показали, що електромагнітні хвилі міліметрового діапазону істотно відрізняються своїми властивостями від «сусідів» — радіохвиль і інфрачервоного випромінювання. З цієї специфікою пов'язані і технічні складнощі, що виникали на шляху учених і винахідників, які освоювали міліметровий діапазон. Проблеми, передусім, пов'язані з передачею електричного сигналу на відстань.

У звичайній лінії електропередачі, яка тягнеться від щогли до щогли через поля і ліси, частина потужності витрачається на випромінювання, але частота коливань така мала (50 Гц), що ці втрати майже непомітні.

На частотах дещо вищих (близько декількох кілогерц) випромінювання вже цілком помітне. Але його можна зменшити, користуючись двожилою лінією передачі, як це робиться при телефонному зв'язку. Проте при подальшому збільшенні частоти випромінювання знову стає занадто сильним. На частоті від декількох кілогерц до декількох тисяч мегагерц електромагнітні сигнали і електромагнітна енергія зазвичай передаються по коаксіальних лініях, тобто по дроту, який розміщено у середині іншого циліндричного провідника.

При проходженні по коаксіальному кабелю сигнали також послаблюються. Причин тому декілька. Це і діелектричні втрати в матеріалі, необхідному для підтримки внутрішнього

провідника; втрати із-за опору ізоляції, обумовлені обмеженим діаметром внутрішнього провідника і, нарешті, втрати на випромінювання, оскільки коаксіальний кабель діє як антена. І знову ж таки: усі складові втрат зростають зі збільшенням частоти сигналу. При правильному підборі діаметрів складових кабелю і матеріалів для його виготовлення можна досягти прийняттого рівня цих втрат, проте, кабелі стають усе більш товстими і жорсткими.

Зрештою, починаючи з частот приблизно 10^{10} Гц, доводиться зовсім відмовитися від використання коаксіального кабелю і пустити сигнал через порожнисту металеву трубку, зазвичай прямокутного перерізу, що називається хвилеводом. Вартість хвилеводів — із-за складної технології виготовлення — значно вища, ніж кабелю, і мати справу з ними дуже клопітно. На відміну від кабелю, хвилеводи не можна згинати в довільному напрямі, необхідно використовувати стандартні зігнуті секції. При монтажі схем застосовуються різноманітні хвилеводні елементи: трійники, мости, відгалужувачі. Хвилеводи з'єднуються торцями і кріпляться спеціальними затискувачами (рис.3).

Електромагнітна хвиля по хвилеводу поширюється без втрат лише за умови: $\lambda/2 < a < l$ і $b < \lambda/2$, де a і b — розміри широкої і вузької сторін прямокутного перерізу хвилеводу, відповідно. Отже на кожен порівняно вузький діапазон довжин хвиль необхідно мати свій комплект хвилеводних елементів.

Для генерації, прийому і посилення міліметрового випромінювання використовуються дуже складні прилади. Виміри на КВЧ вимагають застосування нестандартних методів, а також особливо ретельного контролю параметрів.



Рис. 2 Елементи приладів П.Н. Лебедева



Рис. 3 Хвилеводи для міліметрового діапазону

Порівняно з іншими ділянками електромагнітного спектру, міліметровий діапазон освоївся повільніше, хоча завжди цікавив дослідників, в сенсі як практичного застосування, так і для фундаментальної науки.

Дуже маленька довжина хвилі дає можливість сформувати вузький пучок радіохвиль при порівняно невеликих геометричних розмірах антен. Це дозволяє здійснити спрямовану передачу сигналів з низьким рівнем перешкод, великою дальністю, прихованістю передачі, високою точністю визначення координат об'єктів тощо.

Висока частота сигналів робить можливим ефективний багатоканальний телефонний зв'язок і багатоканальну передачу широкосмугових телевізійних сигналів високої якості за рахунок збільшення смуги частот.

Проникнення хвиль частини ГВЧ діапазону крізь товщу атмосфери Землі дозволяє використовувати цей діапазон для передачі інформації через супутники, в астрономії та космонавтиці.

Не дивно, що значна доля досліджень в області міліметрових хвиль має суто практичну спрямованість і проводиться під егідою військових установ. Публікації з цієї тематики рідко потрапляють у відкритий доступ. Проте в цьому напрямі проводяться і фундаментальні наукові дослідження. Методами мікрохвильової спектроскопії успішно вивчаються важливі властивості речовини. Так, в міліметровій області спектру розташовані обертальні смуги молекул, спектри збудження квазічастинок в кристалах, переходи електронного парамагнітного резонансу.

Та все ж, дослідження, пов'язані з вивченням властивостей міліметрових хвиль, особливостями взаємодії з речовиною, а також їх застосуванням, довгий час залишалися долею обмеженого круга учених та інженерів. Цей напрям вважався хоча і перспективним, але вузькоспеціальним.

Різкий сплеск інтересу наукової спільноти до міліметрових хвиль несподівано виник в середині 60-х років, коли дві незалежні групи дослідників в СРСР і Канаді випадково відкрили незвичайну властивість міліметрових хвиль впливати на мікроорганізми. Про це йшлося в статті «*Релятивістська фізика фантастичних променів*» («Країна знань» № 3, 2011 р.).

Те, що електромагнітне випромінювання може впливати на живі системи, було відомо давно.

Тема «*Електрика і Життя*» бере свій початок ще з класичних дослідів **Луїджі Гальвані**. Багато знаменитих учених вивчали вплив на біологічні об'єкти електричних полів, спочатку постійних, потім змінних. Змінні поля високої напруженості очевидним чином повинні взаємодіяти з живою тканиною, насиченою полярними молекулами води. Коливання напруженості зовнішнього поля збуджують коливання молекул, що призводить до нагріву тканини, іноді значного (згадаєте мікрохвильову піч!). Окрім нагріву, ін-

Аби краще зрозуміти суть дивовижного феномену звернімося до легендарної кривої **Грюндлера-Кальмана** — залежності швидкості розмноження клітин дріжджів від частоти випромінювання (мал. 4). Цей графік, що відбиває результат багаторічної копіткої роботи двох німецьких біофізиків, є прикладом чесного і неупередженого дослідження. Зверніть увагу — швидкість розмноження на кожній з 100 частот опромінення вимірювалася, щонайменше, п'ять разів. У кожному окремому експерименті процес розмно-

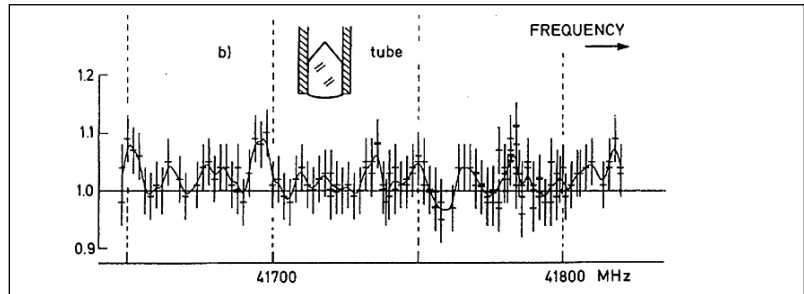


Рис. 4 Залежність швидкості розмноження дріжджових клітин від частоти випромінювання. (W.Grundler, F.Keilmann // «Phys.Rev.Letters», 1983, v.51, N 13).

тенсивні поля, як змінні, так і постійні, можуть впливати на електричні процеси нервової системи, транспорт іонів, кровотік. Давно помічено, що обслуговуючий персонал радіолокаційних станцій (РЛС) частіше скаржиться на самопочуття.

Проте біологічні ефекти міліметрових хвиль погано уклалися в існуючі уявлення про можливі механізми взаємодії електромагнітних хвиль з живими об'єктами. По-перше, потужність цих полів складала мілівати і менше, так що про нагрів не могло бути і мови. По-друге, живі організми досить швидко (впродовж хвилин або годин) реагували на дію, на відміну від, наприклад, персоналу РЛС, що накопичує свої проблеми роками. І головна, найбільш вражаюча риса: виявилася несподівано сильна залежність спричиненого ефекту від довжини хвилі.

Дріжджів безперервно фіксувався впродовж декількох годин (Для більшої точності необхідно було простежити декілька циклів ділення, а у дріжджів час одного циклу складають близько 90 хвилин). Ця залежність показує ефект, спричинений опромінювачем певної форми. Інша — дуже схожа крива і приблизно з тією ж кількістю точок — відповідає іншій геометрії опромінення.

Головною особливістю наведеної кривої є різка залежність від частоти. Відносна зміна значення V всього на 0.01 % призводить до зміни знаку ефекту. Сама залежність в околі «активної» частоти нагадує криву резонансу.

Ще один важливий результат німецьких біофізиків — залежність біологічного ефекту від потужності — демонструє істотну нелінійність. Реакція виникає при деякому, дуже не-

великому, значенні потужності, і не міняється при подальшому її збільшенні. Така поведінка характерна для електронних перемикачів — тригерів — пристроїв, що мають здатність тривалий час знаходитися в одному з двох стійких станів і чергувати їх під впливом зовнішніх сигналів.

«Тригер», «резонанс» — термини радіотехнічні. Тому не дивно, що перші моделі, що пропонувалися для пояснення феномену, ґрунтувалися на аналогіях з радіотехнічними системами. Так, передбачалося існування в живій системі щось на кшталт радіостанції, яка працює в діапазоні ГВЧ. Приймачем і передавачем служать біологічні мембрани, а вбудовані в них білкові молекули грають роль антен. «Резонанс» виникає у разі збігу частоти зовнішнього змінного поля з власною частотою коливального контуру клітини.

Радіотехнічні аналогії — не єдині, за допомогою яких учені намагалися описати загадковий феномен. У іншому підході пропонувався механізм типу фотохімічної реакції. Відомо, що деякі життєво важливі процеси (наприклад, зір) пов'язані з поглинанням кванта енергії молекулою-пігментом. Збуджена молекула запускає хімічну реакцію, чим приводить в дію складний ланцюжок процесів, що закінчується подачею нервового імпульсу на певну ділянку мозку. Зовсім не просто виявилось знайти тип хімічних реакцій, швидкістю яких можна було б керувати за допомогою електромагнітного випромінювання **КВЧ**. Оцінки показали, що, в принципі, такі реакції можуть проходити за участю вільних радикалів або великих металоорганічних молекул.

Ці й інші моделі давали лише якісне пояснення спостережуваним ефектам. Теоретичні ж розрахунки показували їх неспроможність. Каменем спотикання вияви-

лася так звана «проблема kT », суть якої зводиться до наступного.

Енергія кванта випромінювання $h\nu$ в міліметровому діапазоні значно менша за енергію теплового випромінювання kT (тут k — стала **Больцмана**). Навіть для довжини хвилі $\lambda = 1$ мм $h\nu = 1.17 \cdot 10^{-5}$ еВ, тоді як за кімнатної температури $kT = 2.53 \cdot 10^{-2}$ еВ. Енергія кванта в даному діапазоні частот виявляється істотно меншою не лише за енергію електронних переходів (1...20 еВ), але і коливальну енергію молекул (10^{-2} ... 10^{-1} еВ), а також енергію водневих зв'язків (10^{-2} ... 10^{-1} еВ). З наведених оцінок випливає, що не існує простих процесів, здатних пояснити помітний вплив міліметрових хвиль на життєдіяльність організмів. Будь-які з відомих елементарних механізмів поглинання міліметрового кванта енергії виявляються несуттєвими на тлі теплових флуктуацій.

Ще більше ускладнюють ситуацію «резонанси» в спектрах біологічної дії міліметрових хвиль. Зрозуміло, що деяка ізольована молекула може теоретично мати смугу поглинання відповідної ширини, наприклад, на обертальному переході. Проте, в щільному оточенні інших молекул та ще за кімнатної температури, спектральна смуга поглинання багаторазово розширюється — будь-які ознаки резонансів зникнуть. У мікрохвильовій спектроскопії вузькі резонансні смуги поглинання реєструються лише для розріджених газів або при дуже низькій температурі.

Саме вузькі «резонанси» привертати найпильнішу увагу учених. Як вже відзначалося, саме використання терміну «резонанс» припускає наявність у біологічній системі деяких власних частот. Виникло відчуття, що ефекти міліметрових хвиль виявили нову фундаментальну, внутрішньо притаманну усьому Жи-

вому, властивість. Так само, як і будь-який атом, що має свою власну структуру енергетичних рівнів і свій неповторний спектр, кожний живий об'єкт, реагуючи тільки на обрані довжини хвиль, повинен характеризуватися унікальною системою енергетичних рівнів і спектром власних частот. Подібно до «Атласу спектральних ліній хімічних елементів», в недалекій перспективі бачилося створення «Атласу характеристичних частот живих організмів, що населяють Землю».

Як показали подальші дослідження, і до великого розчарування учених, резонансна реакція виникала далеко не завжди. Більш того, результати експериментів, які виконували різні групи дослідників на однакових об'єктах, часто виявлялися суперечливими. У дослідях з бактеріями та іншими одноклітинними організмами отримували дані, які відрізнялися не лише кількісно, але і якісно. Висловлювалося обґрунтоване припущення, що резонансні ефекти міліметрових хвиль на рівні ізольованої клітини носять випадковий, невідтворюваний характер. Ідею з «Атласом характеристичних частот» довелося відкласти на невизначений термін.

У 90-х роках минулого століття, коли пострадянська наука перебувала в кризі, виникла трагікомічна ситуація: представники ученого світу побачили в міліметрових хвилях своєрідну «палочку-стукалочку». Усіма правдами й неправдами роздобувши заповітний генератор, старші і молодші наукові співробітники починали опромінювати усі доступні їм об'єкти: воду, органічні і неорганічні розчини, насіння рослин, бактерії, мікроби, гриби, личинки, комах тощо, з метою виявити хоч який-небудь ефект. Методиці експерименту і контролю параметрів приділялося мало уваги.

«Terra incognita» перетворилася на міфічну Країну Ельдорадо, завоювання якої обіцяло наукову славу і матеріальне благополуччя. Саме на цей період припадає безліч публікацій, що відрізняються дуже невисоким науковим рівнем. Як тут не згадати про німецьку скрупульозність **Грюндлера** і **Кальмана**! Безліч розрізнених і неперевічених фактів породило не меншу кількість інтерпретацій і тлумачень, що аж ніяк не додало ясності в загальну картину.

Втім, у міру ускладнення організму ситуація виправлялася. На рівні людини ефекти міліметрових хвиль проявлялися досить чітко, настільки, що вони послужили основою для розробки нових методів діагностики і терапії. Термін «характеристичні частоти» в медичній практиці прижився.

Зрештою, на сьогодні не існує загальноприйнятої фізичної моделі, здатної несуперечливо пояснити усю сукупність проявів дії міліметрових хвиль на живі організми. Що, втім, не заважає висувати усе нові й нові концепції щодо ролі електромагнітних полів в нашому житті.

Ще в середині 20 століття, в першу чергу, завдяки запитам радіолокації, з високою точністю був виміряний спектр поглинання земної атмосфери. Виявилось, що в міліметровому діапазоні спектру є дві вузькі смуги з максимумами 5 мм і 2.5 мм (60 і 120 ГГц, відповідно), обумовлені поглинанням молекул кисню (рис.5). Тобто, електромагнітне випромінювання відповідних довжин хвиль позаземного походження (наприклад, довгохвильової частини теплового випромінювання Сонця) не досягає поверхні Землі. Тому живі організми в процесі еволюції не придбали природні механізми пристосування до електромагнітних коливань в цьому діапазоні, обумовлених зовнішніми

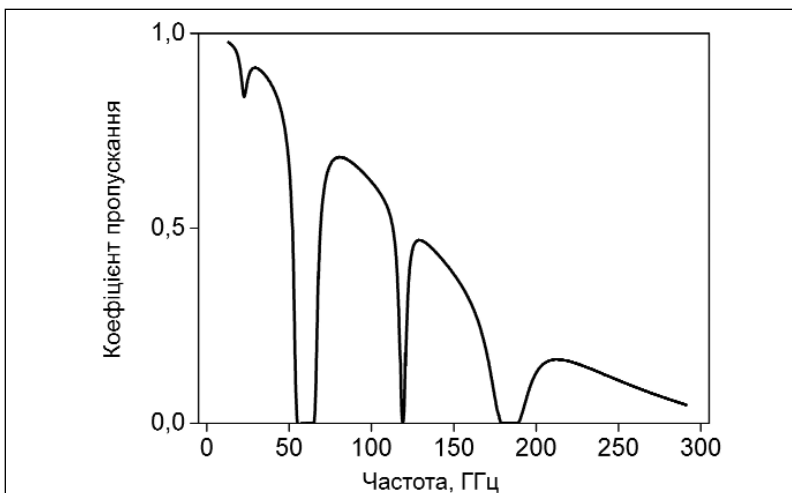


Рис.5 Вертикальне пропускання земної атмосфери в діапазоні КВЧ

причинами. З іншого боку, повна відсутність в довкіллі хвиль деяких частот могла еволюційно призвести до виникнення «виділеного каналу» зв'язку для живих організмів або їх клітин. Тому штучне опромінення міліметровими хвилями організмів наче імітує деякий, зрозумілий їм, сигнал. На цих міркуваннях побудована концепція «інформаційної дії випромінювання на живий організм».

Міліметровий діапазон давно перестав бути «невідомою землею» електромагнітного спектру. Останніми роками міліметрові хвилі знаходять усе більш широке застосування в системах зв'язку наземних пунктів з штучними супутниками Землі, в системах міжсупутникового зв'язку. Робочі частоти мобільних телефонів невіддалено наближаються до діапазону КВЧ. У зв'язку з якісною зміною нашого електромагнітного оточення виникає природне занепокоєння. Як відреагує живий організм на сигнали, що поступають до нього з усіх боків? Який сигнал — «позитивний» чи «негативний» — він обере із загального потоку, і керуватиметься ним в процесі життєдіяльності? На ці та інші питання ми спробуємо відповісти в наших подальших публікаціях.

PS. Може здатися дивовижним, але виявити ефект дії міліметрових хвиль на живі клітини (наприклад, дріжджі) зовсім неважко. Причому для цього не потрібний промисловий генератор ГВЧ. Скориставшись ідеями П.Н. Лебедева, можна змайструвати необхідний прилад самостійно. Для цього слід помістити іскровий розрядник усередині короткого відрізка хвилеводу або просто металевий трубки потрібного перерізу. Іскровий розряд, отримуючи енергію від звичайної батарейки, генерує електромагнітні хвилі в дуже широкому діапазоні частот. У цьому можна переконатися по характерному потіскуванню радіоприймача, поблизу якого виникає електрична іскра. Хвилевід виконує функцію фільтру, що виділяє хвилі тільки певної довжини. Звичайно, потужність таких хвиль буде занадто низькою для прямої реєстрації, але живі клітини можуть їх відчутти і відреагувати, наприклад, невеликим уповільненням швидкості розмноження.

А.В. Якунов,

кандидат фізико-математичних наук
доцент кафедри оптики фізичного
факультету
КНУ імені Тараса Шевченка
E-mail: yakunov@univ.kiev.ua