

4.6. Електромагнітні хвилі



4.6.1

- Передумови створення теорії електромагнітних хвиль

4.6.2

- Властивості електромагнітних хвиль

4.6.3

- Здобуття електромагнітних хвиль. Винайдення радіо

4.6.4

- Шкала електромагнітних хвиль

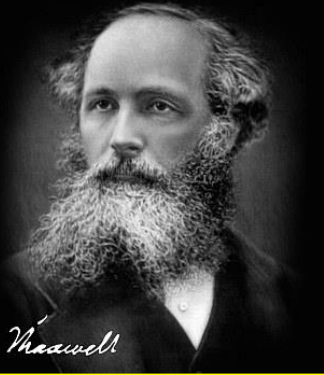
4.6.5

- Застосування електромагнітних хвиль

4.6.1. Теорія електромагнітних хвиль Максвелла

Узагальнюючи *закони електромагнетизму*, Джеймс Клерк Максвелл висловив дві гіпотези.

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\end{aligned}$$



1. Гіпотеза про існування, поряд з електростатичним, **вихрового електричного поля**, так що сумарне електричне поле буде:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{ст}} + \vec{E}_{\text{вихр}}$$

Причому, циркуляція електростатичного поля дорівнює нулеві:

$$\oint_L (\vec{E}_{\text{ст}} \cdot d\vec{\ell}) = 0,$$

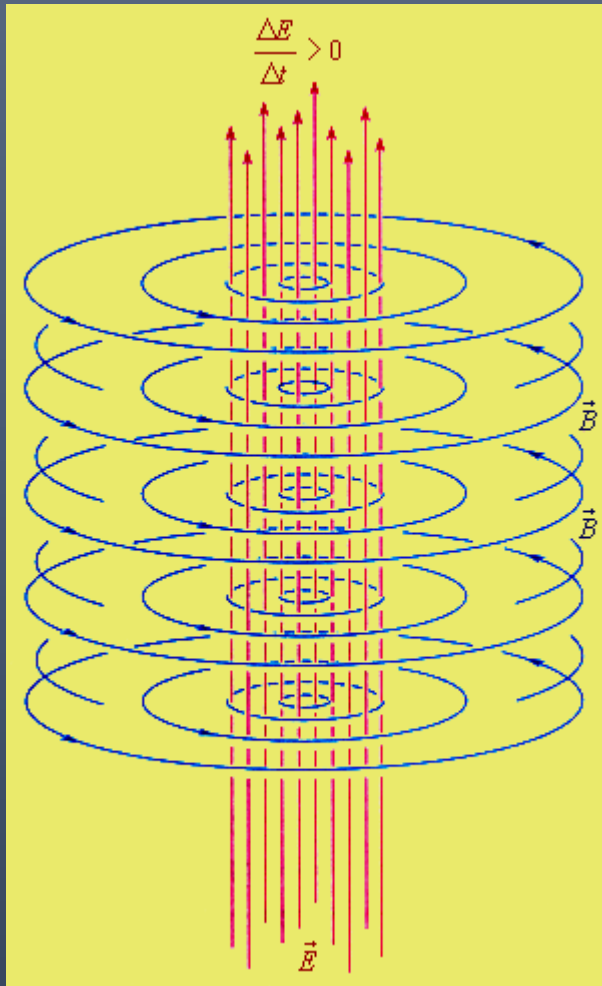
а вихрового численно рівна ЕРС індукції:

$$\oint_L (\vec{E}_{\text{вихр}} \cdot d\vec{\ell}) = \varepsilon_i$$

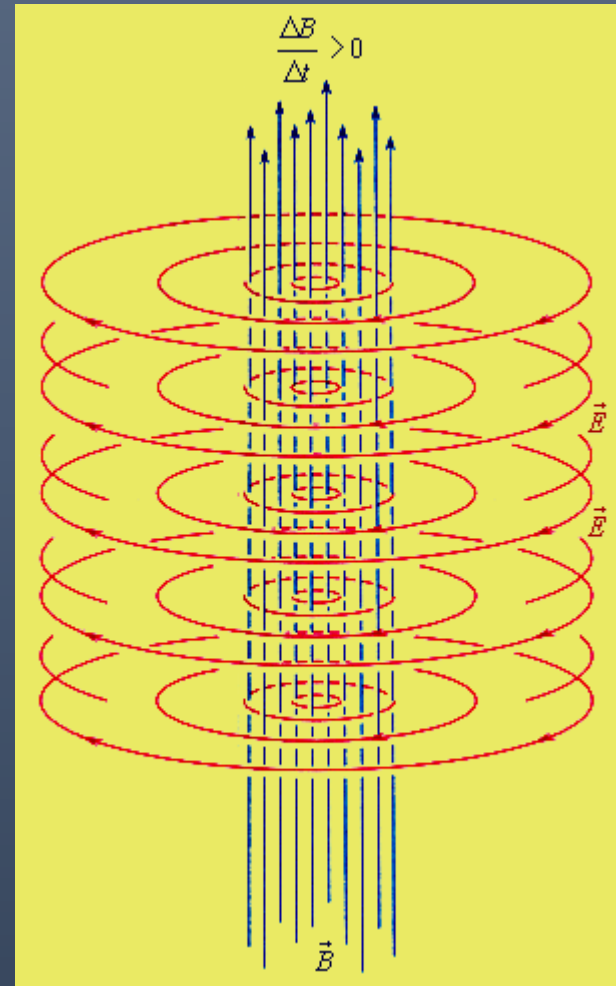
2. Гіпотеза про існування, поряд зі струмом провідності $\vec{j}_{\text{пр}}$, **струмів зміщення** – *змінного електричного поля*, яке також здатне породжувати магнітне поле:

$$\vec{j}_{\text{зм}} = \frac{d\vec{D}}{dt}$$

4.6.1. Теорія електромагнітних хвиль Максвелла

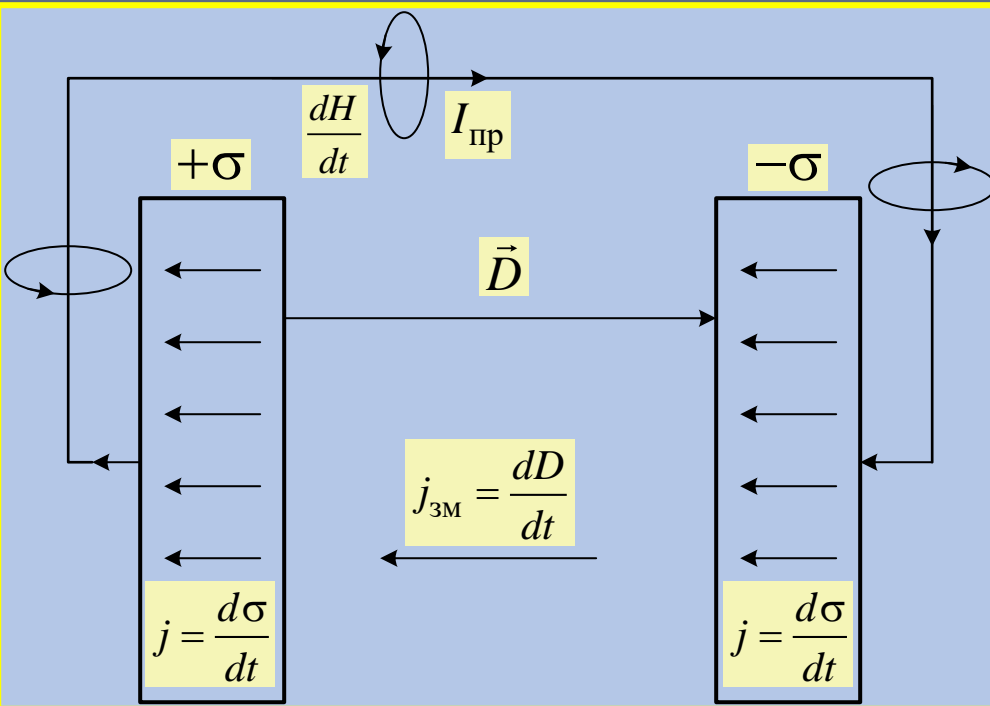


Закон електромагнітної індукції



Гіпотеза Максвелла

Розглянемо процес розрядження конденсатора та існування струму у колі



Числові значення густини струму у товщі обкладки дорівнює похідній за часом від густини заряду:

$$j = \frac{I}{S} \quad \sigma = \frac{q}{S} \Rightarrow q = \sigma S$$

$$j = \frac{I}{S} = \frac{dq}{dt \cdot S} = \frac{d(\sigma S)}{dt \cdot S} = \frac{S d\sigma}{dt \cdot S} \Rightarrow j = \frac{d\sigma}{dt}$$

У просторі між обкладками така зміна густини заряду зумовлює зміну вектора індукції електричного поля.
(згідно з теореми Гауса для електричного поля конденсатора $D = \sigma$).

Зміну вектора електричної індукції Дж. К. Максвел назвав **струмом зміщення**:

$$\frac{dD}{dt} = j_{зм}$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dI_{зм}}{dS} \Rightarrow$$

$$I_{зм} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S (D dS)$$

Оскільки при розрядження конденсатора поле між його обкладками зменшується, то похідна dD/dt від'ємна, отже, вектор $\vec{j}_{зм}$ спрямований протилежно до вектора \vec{D} .

Висновок: під час розрядження конденсатора струм провідності замикається струмом зміщення!!!

Отже, аналогічно до закону електромагнітної індукції, зі зміною у часі індукції D (зміщення) електричного поля виникає магніторушійна сила \mathcal{E}_m .

Тобто зміна у часі електричного поля має спричинити виникнення вихрового магнітного поля:

$$\oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{D} d\vec{S})$$

Крім цього, як відомо, вихрове магнітне поле утворюється також струмами провідності, що описується законом повного струму

$$\oint_l (\vec{H} d\vec{l}) = \int_S (\vec{j} d\vec{S})$$

Поєднуючи обидві причини виникнення вихрового магнітного поля та, матимемо:

$$\oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = \int_S (\vec{j} d\vec{S}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{D} d\vec{S})$$

Висновок: в природі існує *два джерела вихрового магнітного поля*

– струм провідності

$$I = \int_S (\vec{j} d\vec{S})$$

– змінне у часі електричне поле

$$I_{\text{ЗМ}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{D} d\vec{S})$$

Система рівнянь Максвелла:

- є узагальненим математичним записом основних експериментальних законів електромагнітних явищ у довільному середовищі;
- Встановлює співвідношення між векторними характеристиками електромагнітного поля E , B , D та H та розподілом у просторі їхніх джерел: електричних зарядів і струмів.

Перше рівняння Максвелла – це узагальнення закону Біо – Савара – Лапласа і є більш узагальненою формою закону повного струму, який відображає той експериментальний факт, що джерелами вихрового магнітного поля можуть бути струми провідності і струми зміщення.

$$\oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = \int_S (\vec{j} d\vec{S}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{D} d\vec{S})$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = - \frac{d}{dt} \int_S (\vec{B} d\vec{S})$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Друге рівняння Максвелла є математичним записом експериментального закону електромагнітної індукції Фарадея. Узагальнений фізичний зміст його полягає в тому, що будь-яка зміна в часі магнітного поля спричиняє збудження вихрового електричного поля.

Система рівнянь Максвелла:

Третє рівняння Максвелла відображає експериментальний факт *відсутності в природі магнітних зарядів*, тобто відсутність джерел магнітного поля, подібних до джерел електричного поля (зарядів).

$$\int_S (\vec{B} d\vec{S}) = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\int_S (\vec{D} d\vec{S}) = \int_V \rho dV$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

Четверте рівняння Максвелла є узагальненням, на основі теореми Гаусса, закону Кулона і фізично вказує на *існування в природі джерел електричного поля* у вигляді електричних зарядів, розподілених у просторі з об'ємною густиною ρ

Система рівнянь Максвелла:

Матеріальні рівняння відображають властивості середовища і пов'язують між собою окремі характеристики електромагнітного поля:

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

$$\vec{j} = \sigma\vec{E}$$

Найважливіший **висновок** теорії Дж. Максвелла: існування магнітного поля струмів зміщення, дав Максвеллу можливість **передбачити** існування *електромагнітних хвиль* – змінного електромагнітного поля, що поширюється у просторі з кінцевою швидкістю.

Цей висновок і теоретичні дослідження властивостей електромагнітних хвиль привели Максвелла до створення електромагнітної теорії світла, згідно з якою **світло також є електромагнітною хвилею.**

Диференціальне рівняння електромагнітної хвилі

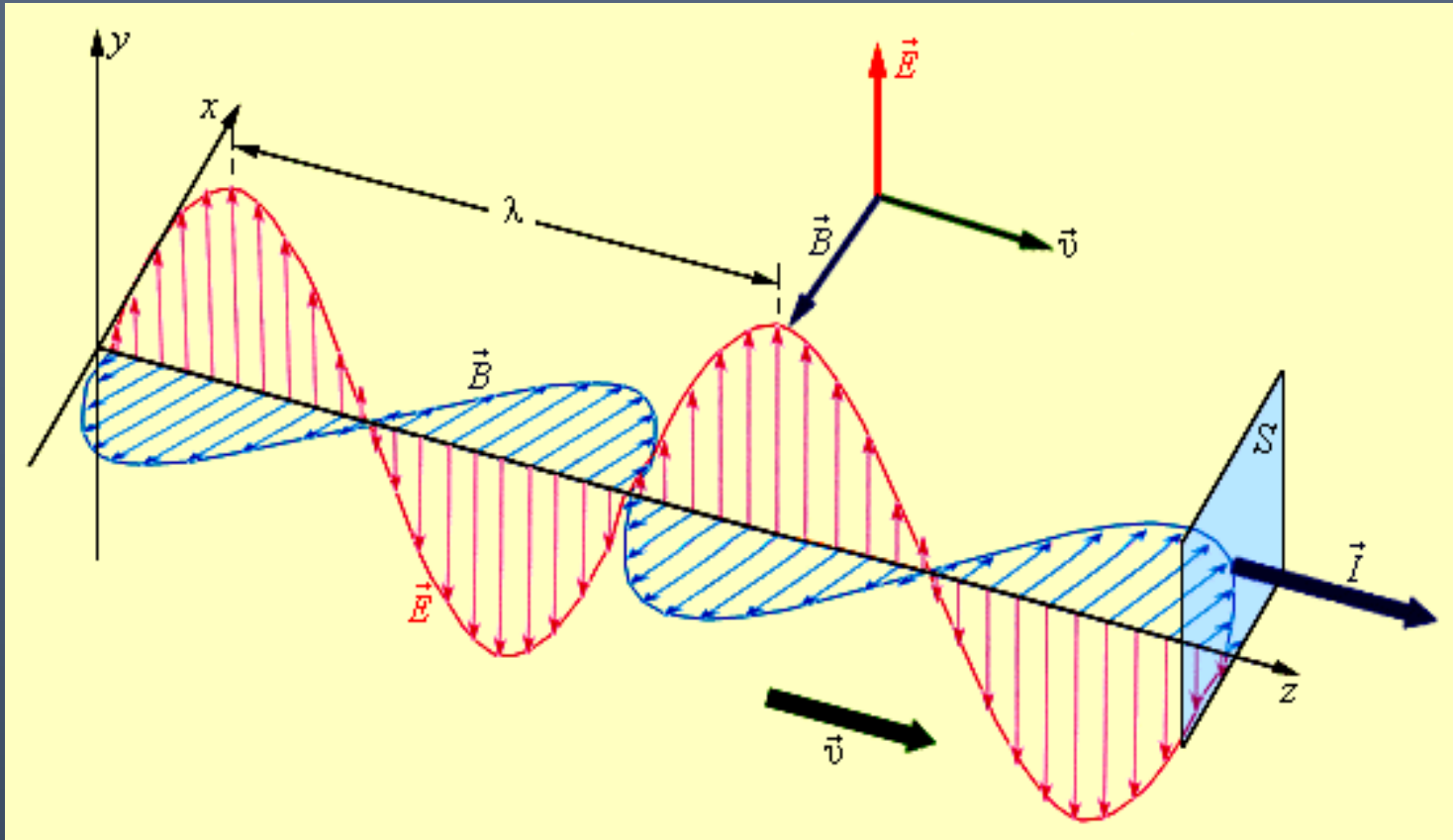
Виводиться з системи рівнянь Максвелла
електромагнітного поля.

Для електричної складової поля у випадку
плоских хвиль у вакуумі має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

4.6.2. Властивості електромагнітних хвиль

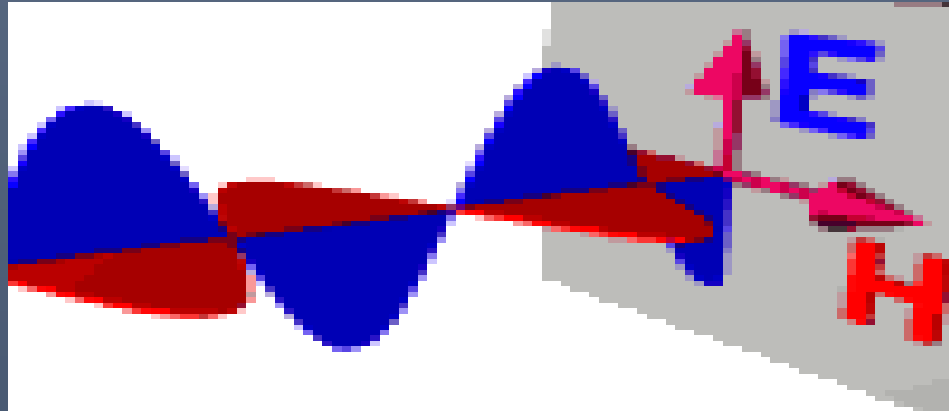
1. Електромагнітні хвилі є поперечними



$$E_y = E_{0y} \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{z}{v} \right)$$

$$B_x = B_{0x} \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{z}{v} \right)$$

2. Розповсюджуються з кінцевою швидкістю



У середовищі

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}$$

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} = \frac{c}{v}$$

У вакуумі

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = c$$

3. Відбуваються взаємні перетворення електричного і магнітного полів

$$\frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

4. Переносять енергію:

Вектор Пойтинга -

визначає густину потоку енергії електромагнітної

хвилі

$$\vec{I} = [\vec{E} \times \vec{H}]$$

$$I = \frac{\Delta W_{EM}}{S \cdot \Delta t} = (\omega_E + \omega_M) \upsilon$$



П.М. Лебедєв
(24.02.1866–
01.03.1912)

5. Створюють тиск

- у 1895 створив найтоншу установку, за допомогою якої вперше отримав міліметрові електромагнітні хвилі
- встановив їх відбивання, подвійне променезаломлення, інтерференцію та ін. явища
- у 1901 вперше виявив і виміряв тиск світла на тверде тіло, підтвердивши кількісно теорію Максвелла
- у 1909 вирішив найважчу експериментальну задачу - встановити і виміряти тиск світла на газу
- досліджував роль обертання Землі у виникненні земного магнетизму



6. Мають імпульс та масу

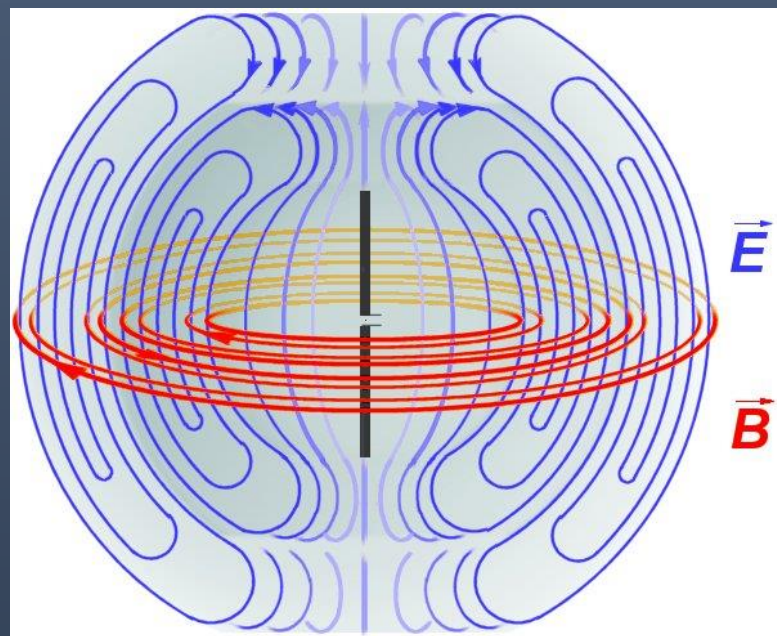
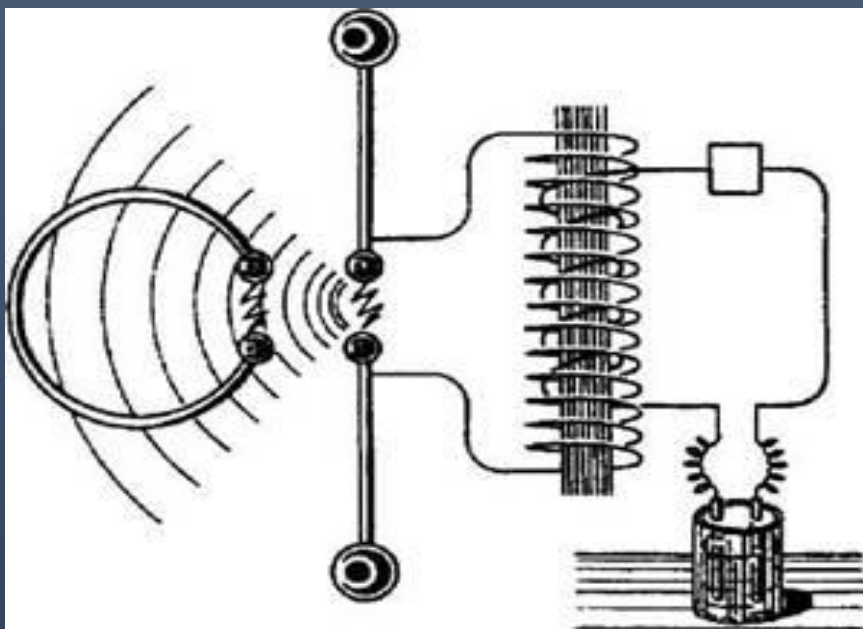
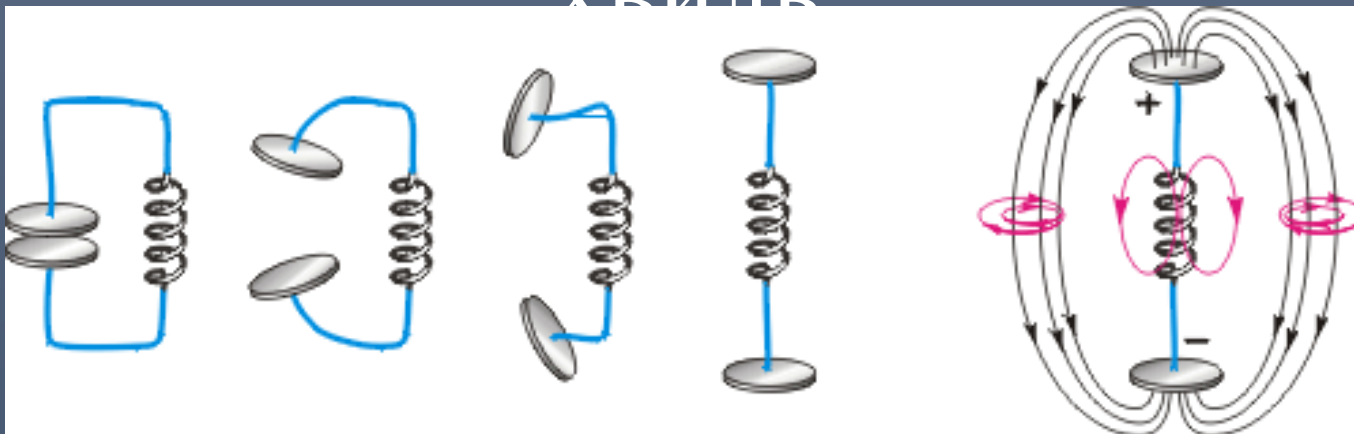
$$p = \frac{W_{EM}}{c}$$

$$W_{EM} = m_{EM} c^2$$



4.6.3. Здобуття електромагнітних

ХВИЛЬ





Генріх Герц
(22.02.1857–
01.01.1894)

-- у 1886-89 експериментально довів існування електромагнітних хвиль і дослідив їхні властивості (віддзеркалення від дзеркал, заломлення в призмах тощо)

-- підтвердив висновки теорії Максвела про те, що швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у повітрі дорівнює швидкості світла

-- встановив тотожність основних властивостей електромагнітних і світлових хвиль

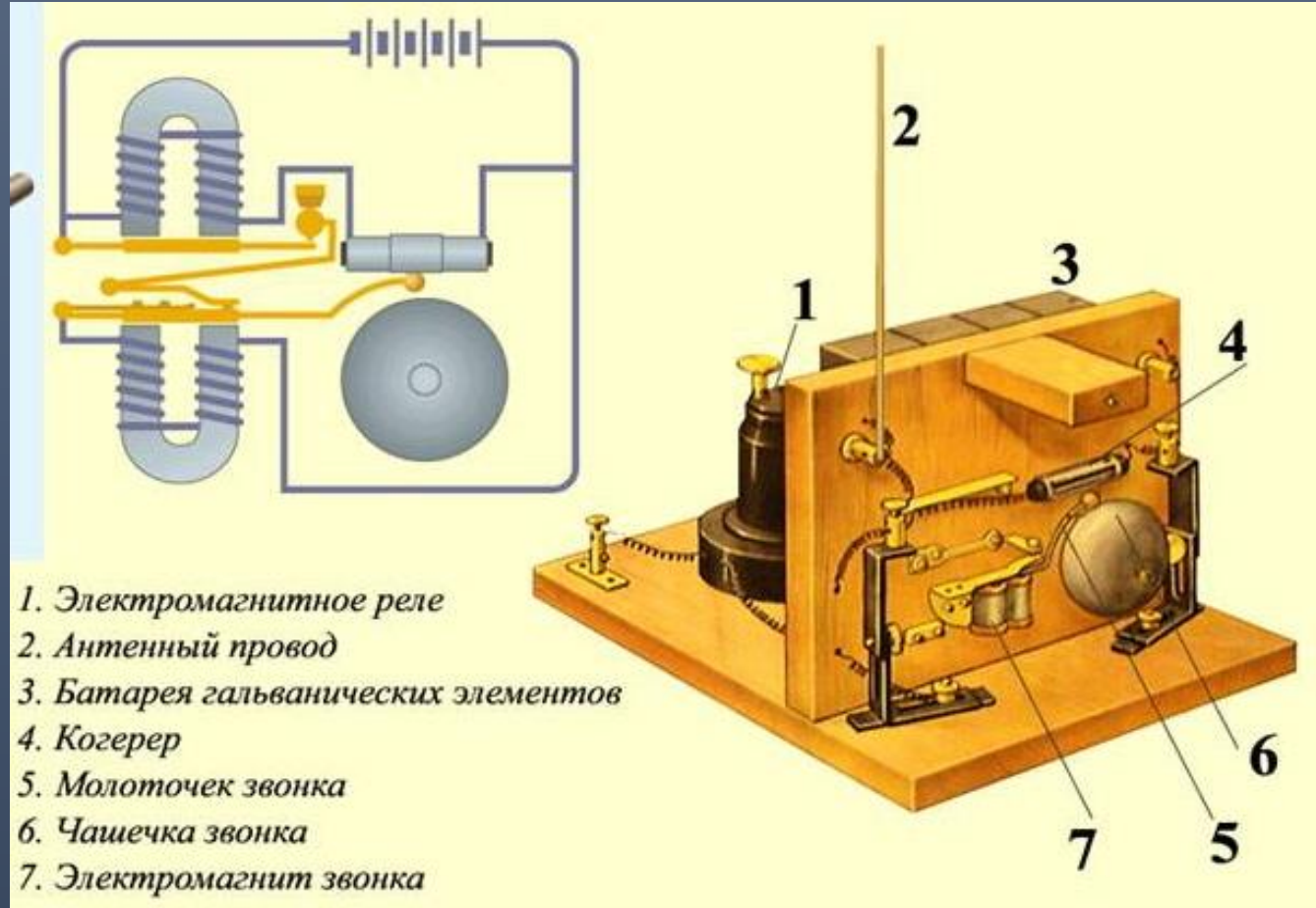
-- 1886-87 Герц вперше спостерігав і дав опис зовнішнього фотоефекту

-- іменем Герца названа одиниця частоти коливань

Радио Попова

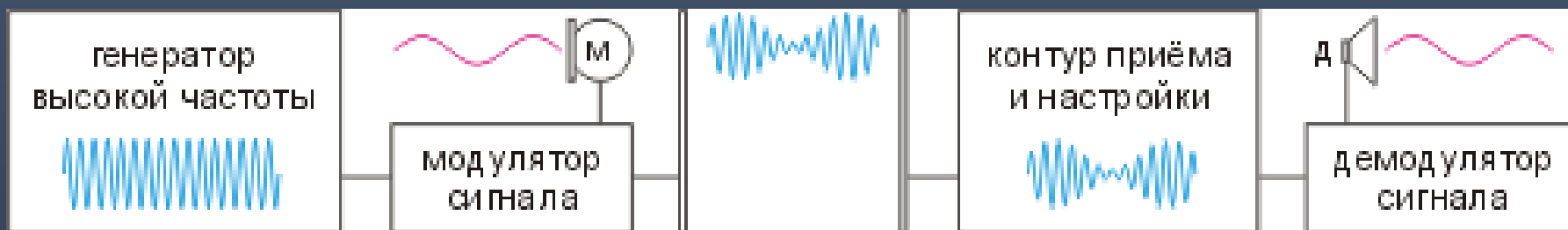
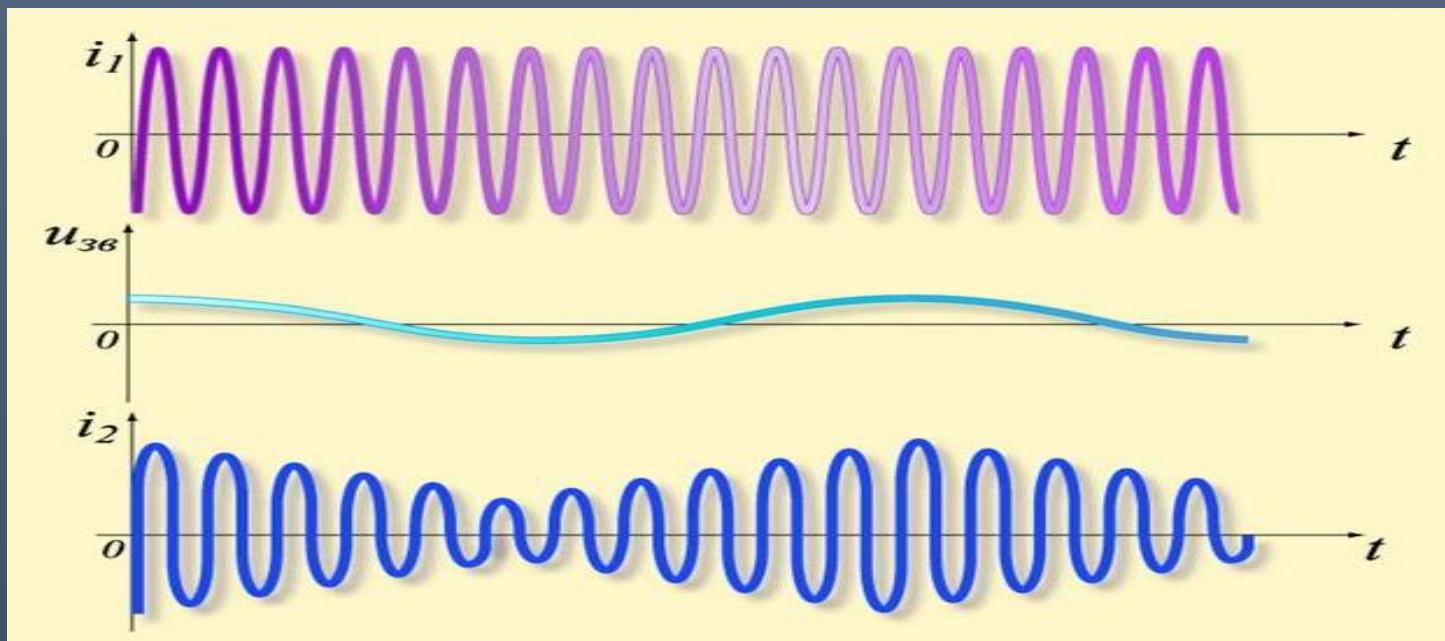


О.С. Попов
(04.03.1859–
13.12.1905)

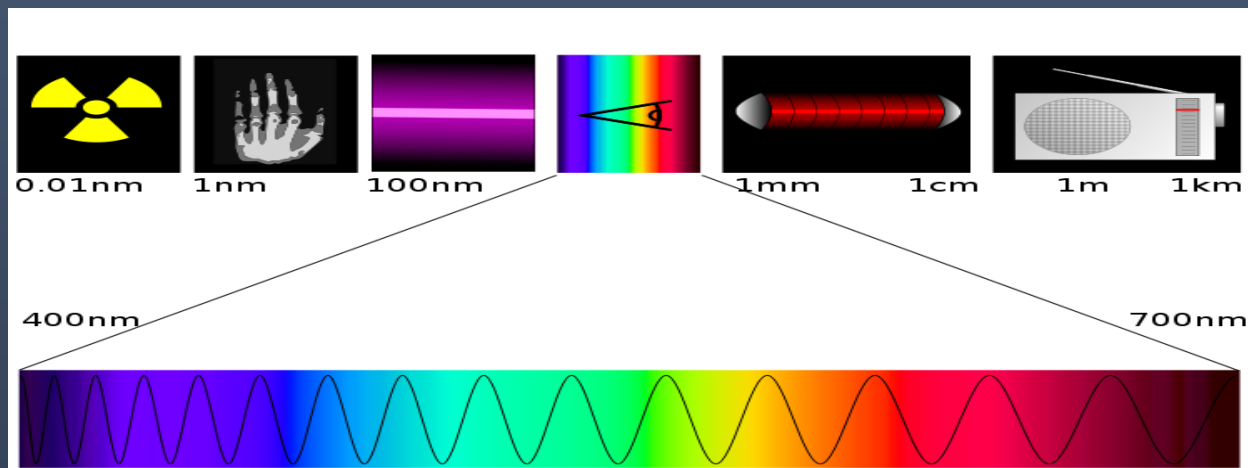




Принцип теле – радіозв'язку



4.6.4. Шкала електромагнітних ХВИЛЬ



4.6.5. Застосування електромагнітних хвиль

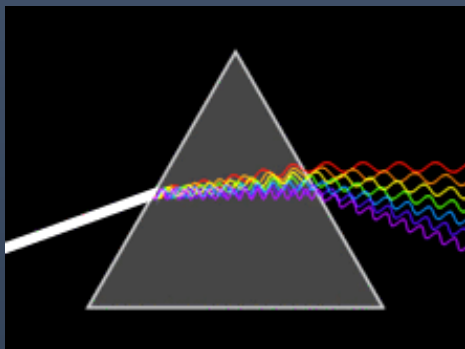
Відкриття інфрачервоних електромагнітних хвиль



Уільям
Гершель

(15.11.1738–
25.06.1822)

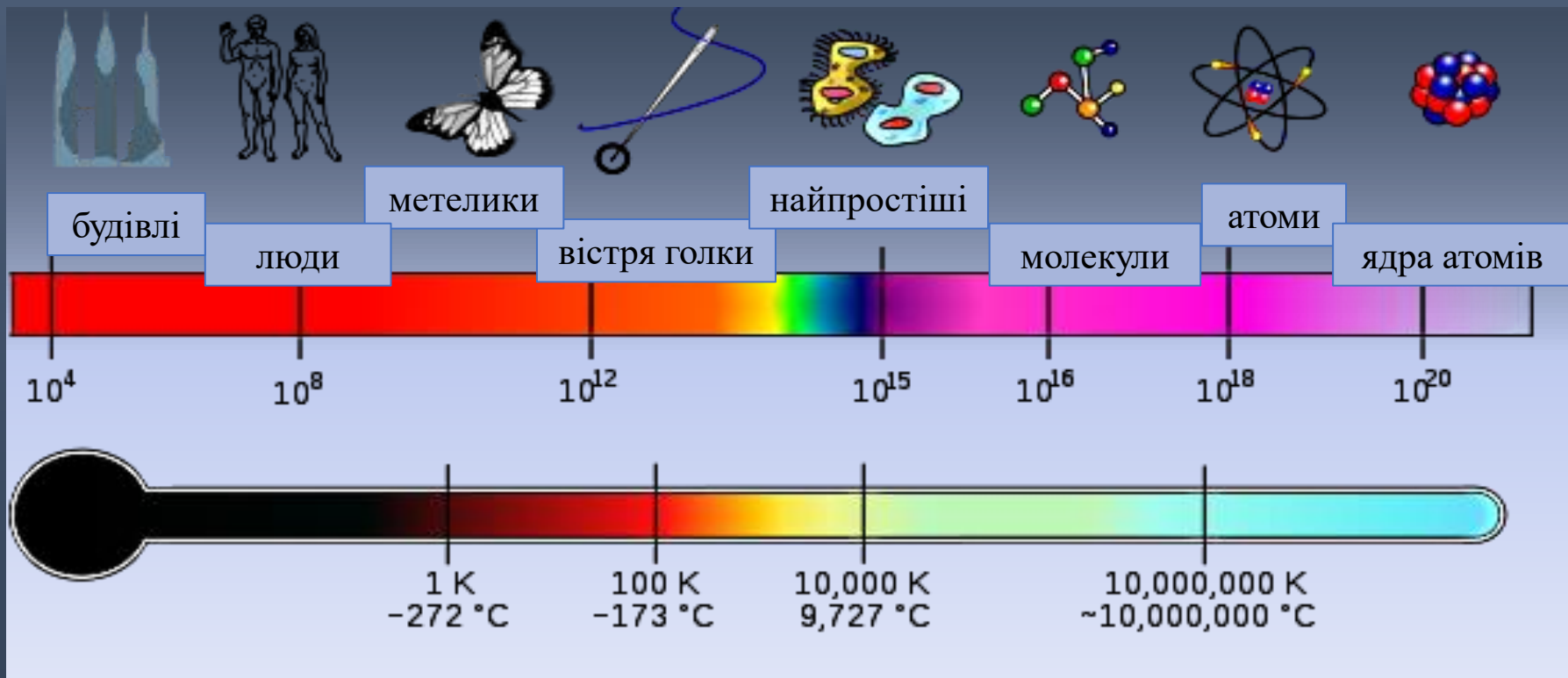
У 1800 році в ході витонченого експерименту: розщепнувши сонячне світло призмою, Гершель помістив термометр відразу за червоною смугою видимого спектру і показав, що температура підвищується, а, отже, на термометр впливає світлове випромінювання, недоступне людському погляду.



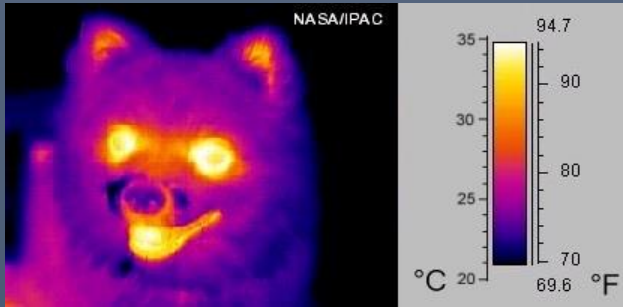
Інфрачервоні електромагнітні хвилі

Інфрачервоні спектри пов'язані з обертальними і коливальними рухами в молекулі, а також з електронними переходами в атомах і молекулах.

Випромінюються нагрітими тілами



Застосування хвиль інфрачервоного діапазону



1

- Для сушіння лакофарбових покриттів

2

- Захист від корозії

3

- Дистанційне управління

4

- Стерилізація харчових продуктів

5

- Інфрачервоні обігрівачі

6

- Тепловізори та нічна зйомка

7

- Медицина та косметологія

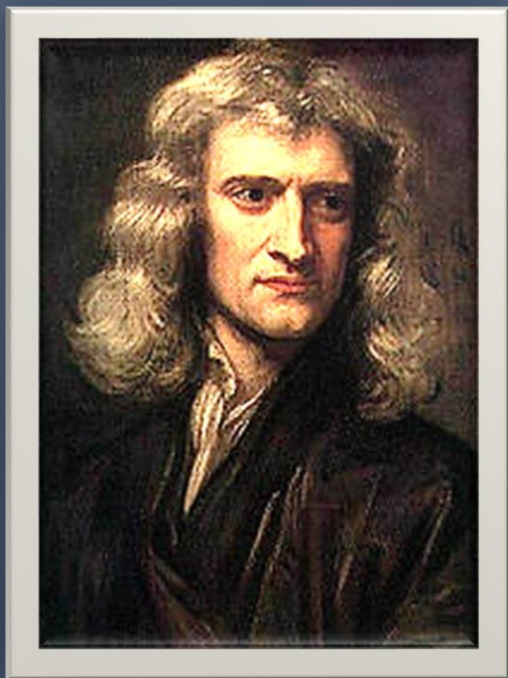
8

- Терморезистори та термометри опору

9

- Термолокатори у змій, кажанів

Оптичний діапазон електромагнітних хвиль та його дослідження

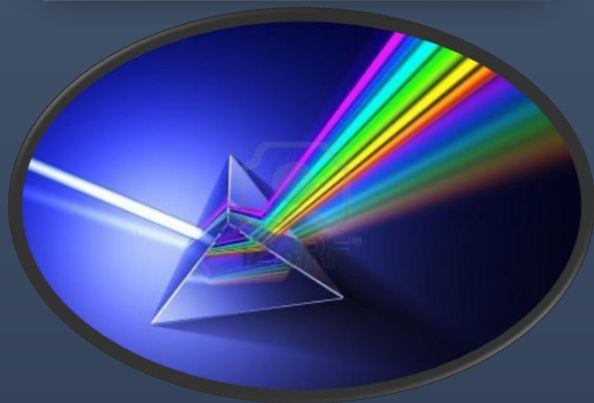


Першим пояснив спектр видимого випромінювання

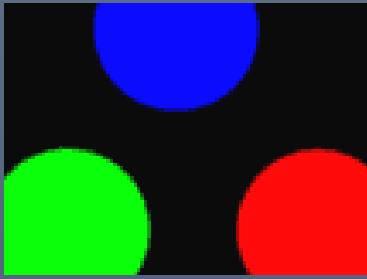
Першим використав назву «спектр» - бачення, поява

Вважав світло корпускулами

Відкрив дисперсію світла в призмах



Поділив світло на 7 кольорів



Видиме світло

Властивості

- відбивається
- заломлюється
- робить видимими об'єкти
- взаємодіє з електронами (фотоефект)
- фотосинтез
- спричиняє хімічну дію

Застосування

- болометрія
- освітлення
- медичні прилади (мікроскопи, окуляри, ендоскопи, ларингоскопи)
- оптиковолокно
- фотографія
- сонячні батареї

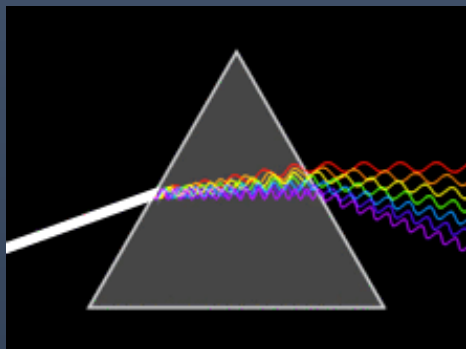
Відкриття хвиль ультрафіолетового діапазону



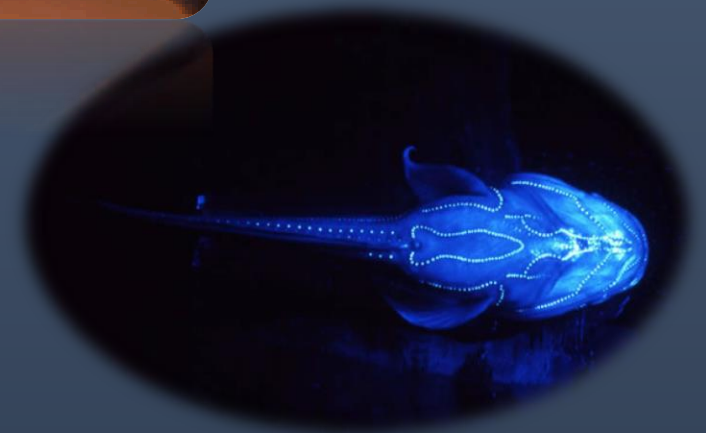
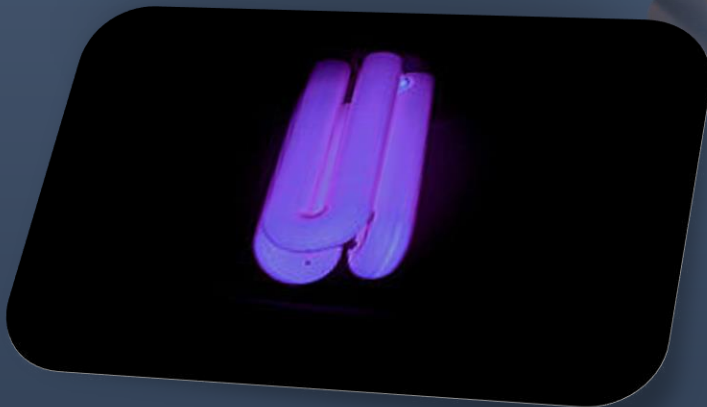
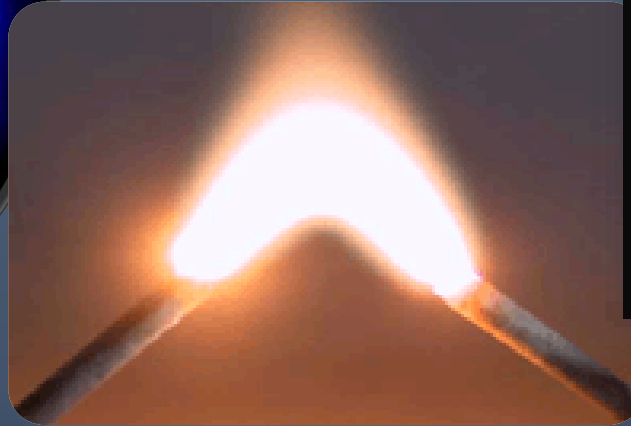
Йоганн
Ріттер

(16.12.1776–
23.01.1810)

У 1801 р., використовуючи призму, ставив досліди по дослідженню хімічної дії різних ділянок світлового спектру. В результаті Ріттер виявив, що почорніння хлориду срібла зростає при переході від червоного до фіолетового кінця спектру і стає максимальним за межами фіолетового кольору.



Джерела хвиль ультрафіолетового діапазону



Застосування хвиль ультрафіолетового діапазону



1

- Спектрометрія

2

- Аналіз мінералів (випромінюють видиме світло)

3

- Дезінфекція води

4

- Захист документів від підробки

5

- Знезараження ультрафіолетовим випромінюванням

6

- У криміналістиці

7

- Сприяють утворенню вітаміна D, серотоніна

8

- Викликають люмінесценцію речовин

9

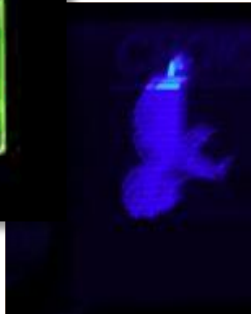
- Пастки для комах

11

- Тверднення полімерів

12

- Створення світлових ефектів





Застосування радіохвиль

1

- Радіомовлення, телебачення

2

- Радіолокація

3

- Безпроводні комп'ютерні мережі

4

- Радіоастрономія

5

- Медицина (УВЧ-фізіотерапія)

6

- Мобільні телефони

7

- Радіозв'язок

8

- Супутникова альтиметрія

9

- Мікрохвильові печі

Застосування рентгенівських хвиль



1

- Рентгенологія (діагностика та лікування)

2

- Дефектоскопія

3

- Контроль якості виробів

4

- Рентгеноструктурний аналіз будови речовини

5

- Рентгенофлуоресцентний аналіз

6

- У криміналістиці

7

- Рентгенотелевізійні інтроскопи (аеропорти)

8

- Викликають люмінесценцію речовин

