Основи формування і реєстрації корисного сигналу в діапазоні високих енергій

Джерела природного випромінювання

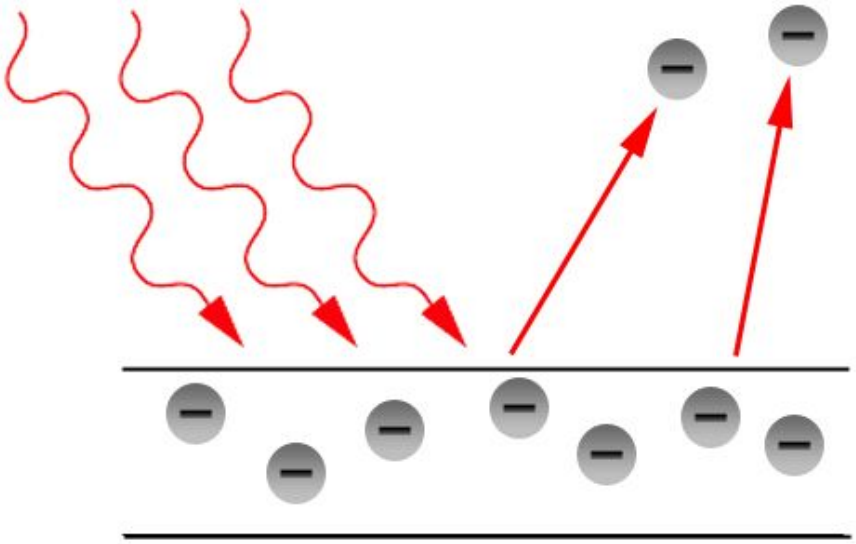
джерело випромінювання	період напіврозпаду	тип випромінювання	характерна енергія випромінювання
^{238}U	4.5×10^9 yr	α	4.18, 4.13
^{234}Th	24.5 days	β	0.19, 0.1
		γ	0.09, 0.06, 0.03
^{234}Pa	1.1 min	β	2.31, 1.45, 0.55
		γ	1.01, 0.77, 0.04
^{234}U	2.5×10^{15} yr	α	4.77, 4.72
		γ	0.05
^{230}Th	8.3×10^4 yr	α	4.68, 4.62
^{226}Ra	1620 yr	α	4.78, 4.59
		γ	0.19
^{214}Bi	19.7 min	β	3.18, and many others
		γ	2.43, 2.2, and many others

Крім того, існує багато джерел антропогенного характеру (в першу чергу – забруднень), а також задачі, пов'язані із визначенням ізотопів карбону, титану, свинцю, калію тощо

Реєстрація випромінювання високих енергій

Для реєстрації випромінювання високих енергій (високочастотного діапазону) використовують особливості взаємодії випромінювання високої енергії з матерією:

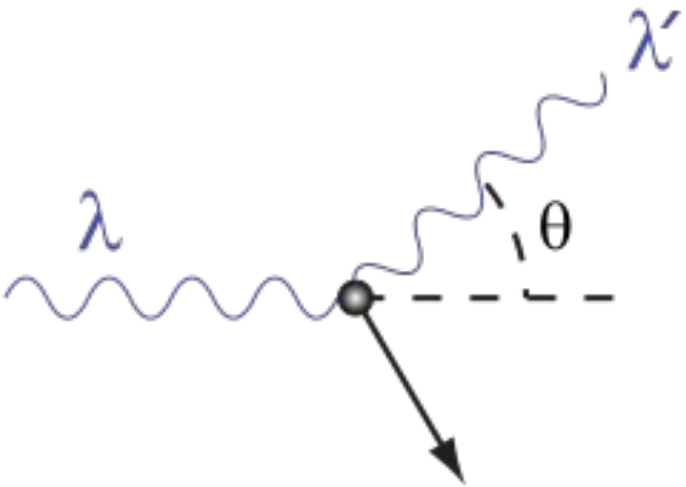
і) Фотоефект (фотоелектричні ефекти): ефекти, пов’язані із вибиванням електронів із металів, окремих типів рідини та газів, використовуються для реєстрації випромінювань з низькими енергіями (< 0,5 МеВ)

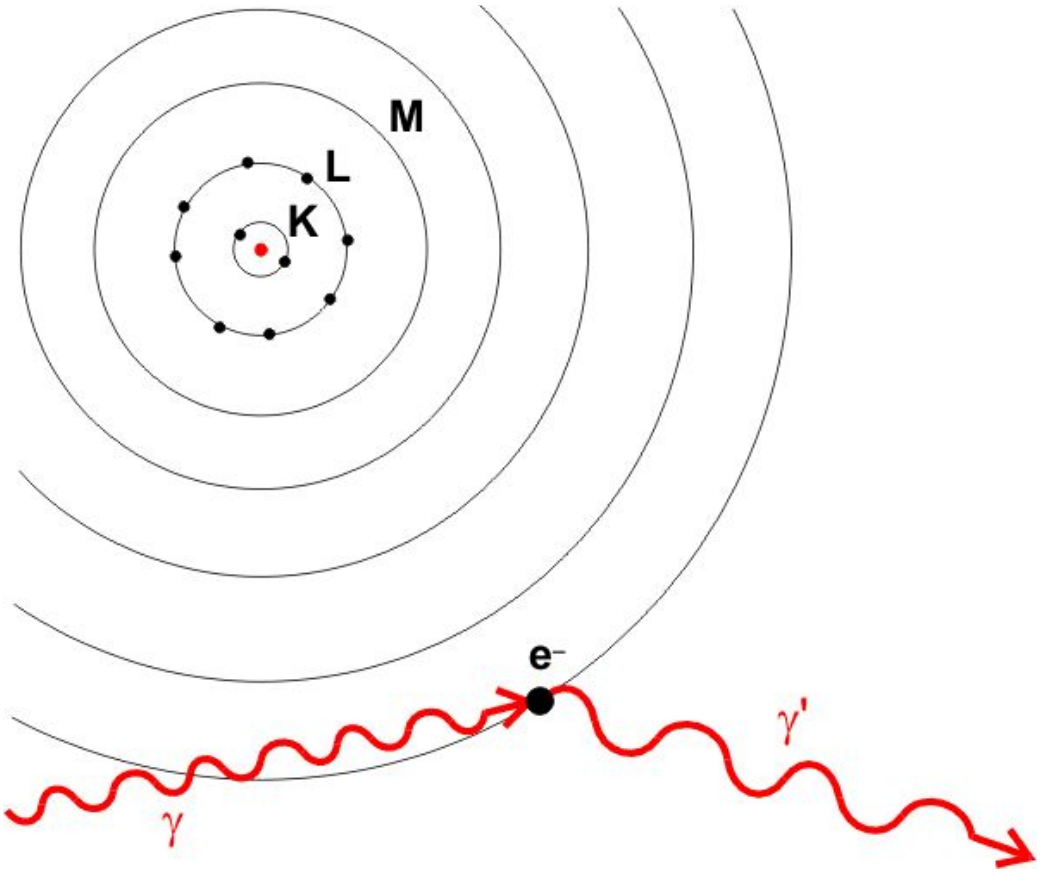


залежність швидкості вибитих електронів від довжини хвилі опромінення:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A$$

Реєстрація випромінювання високих енергій



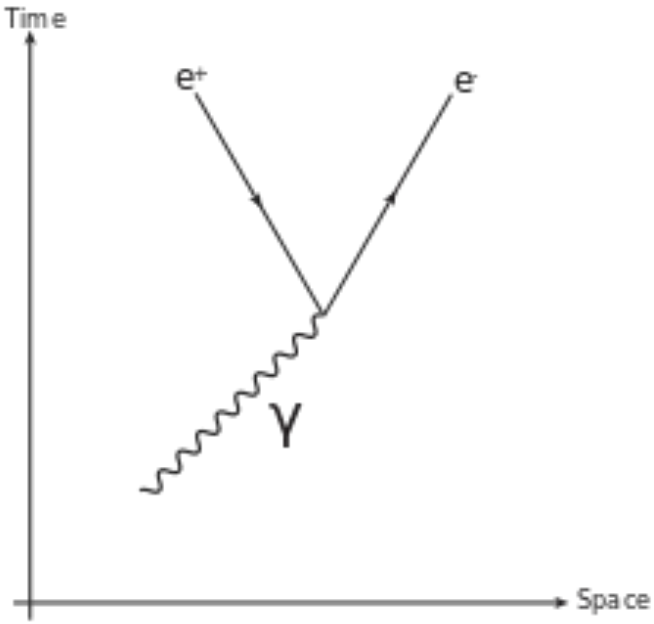


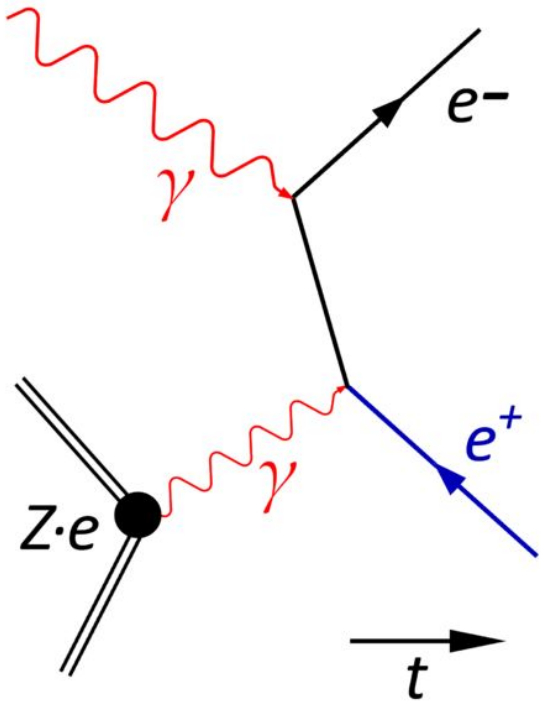
ii) Комптон – ефект, явище непружного розсіювання фотонів на вільних заряджених частинках, використовується для реєстрації випромінювань середніх енергій (0,5 – 1,5 МеВ)

зміна довжини хвилі фотона при комптонівському розсіюванні на непорушному вільному електроні :

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Реєстрація випромінювання високих енергій





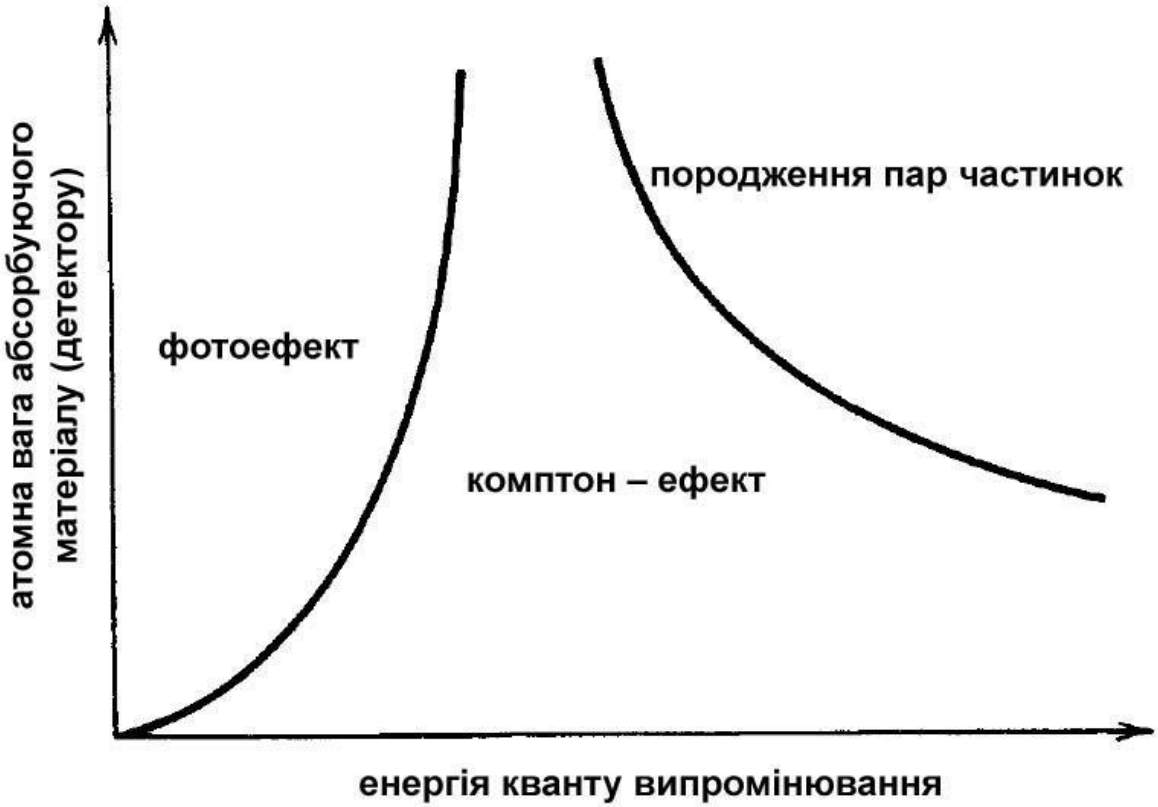
iii) Породження пар частинок - зворотний до анігіляції процес, в якому виникають пари частинка-античастинка, використовується для реєстрації квантів високих енергій (> 3 МеВ)

$$w = \frac{ce^2 E^2}{4\pi^3 \hbar^2} \exp\left\{ -\frac{E_{cr}}{E} \right\}$$

інтенсивність народження пар (ймовірність утворення електрон – позитронних пар в одиниці об’єм за одиницю часу – формула Швінгера):

$$E_{cr} = \frac{\pi m^2 c^3}{\hbar e} \approx 10^{16} W / cm$$

Реєстрація випромінювання високих енергій



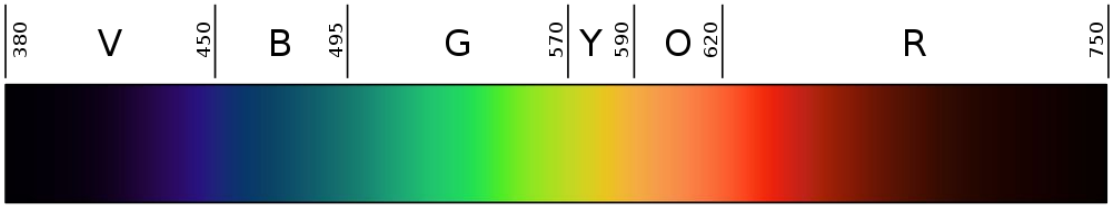
Детектори, що реєструють індуковане світлове випромінювання, виготовляються з неорганічних кристалів активованого талієм йодиду калію, що завдяки високій щільності (3,67 г/см3) може реєструвати практично всі гамма-кванти,

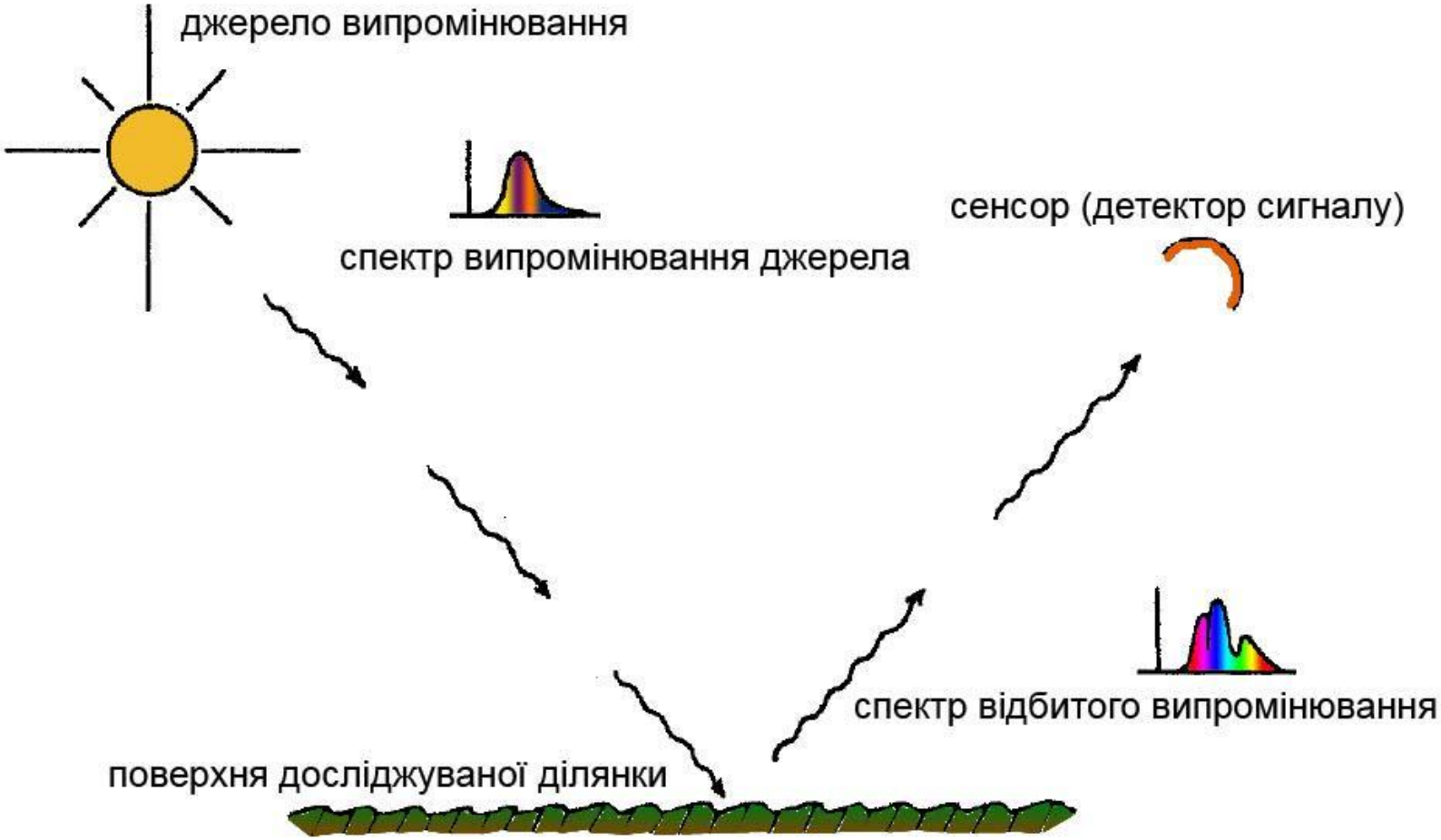
Інший тип детекторів реєструє окремі заряди, виготовляються з напівпровідників, мають кращу спектральну розрізненість

Формування корисного сигналу в оптичному діапазоні

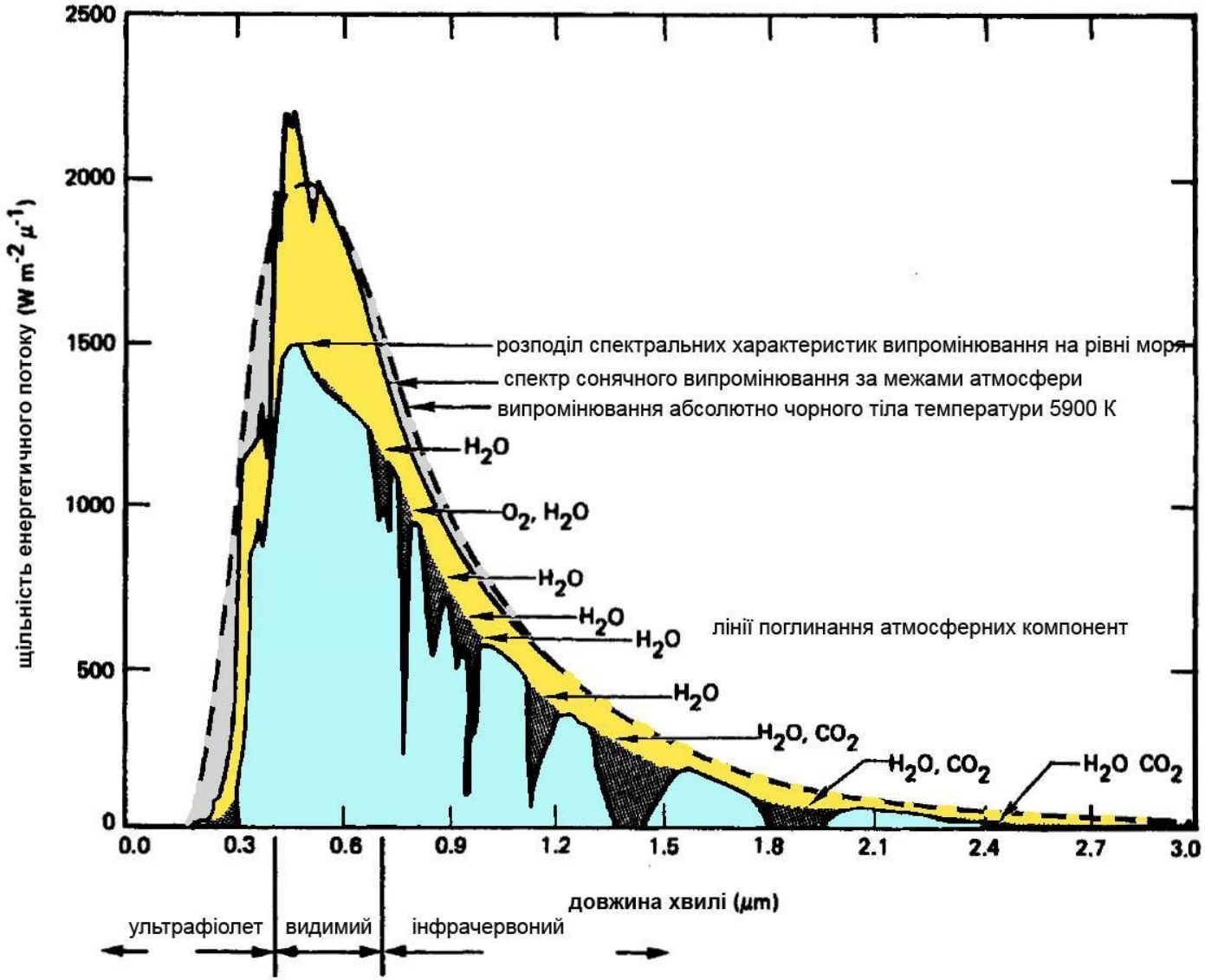
Формування сигналів в оптичному діапазоні

Розподіл видимої частини спектру



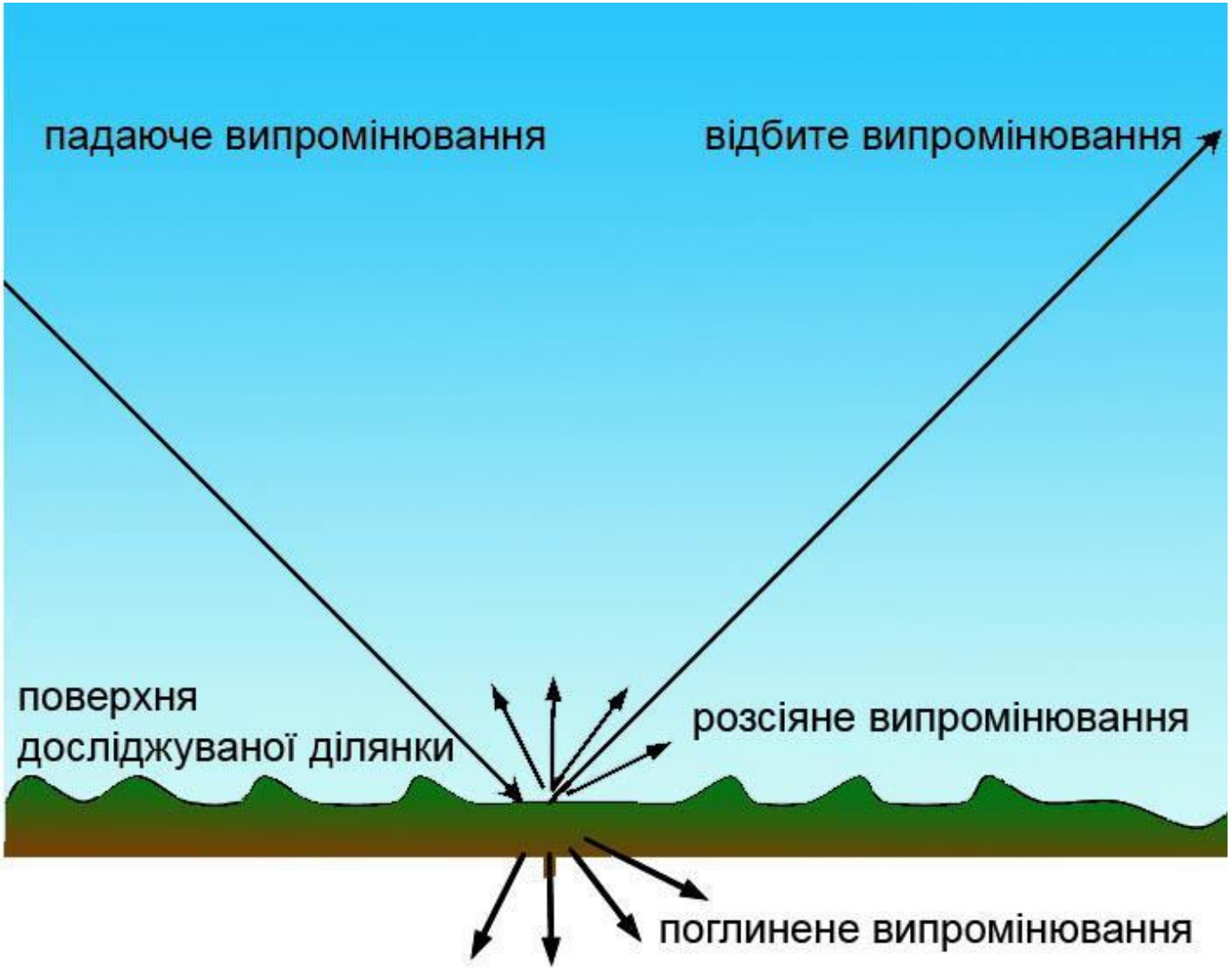


Розподіл спектральної щільності випромінювання в оптичному діапазоні



Взаємодія випромінювання з поверхнею

Основними процесами є розсіювання, поглинання та відбиття випромінювання поверхнею та середовищем



Терміни і визначення

ВІДБИТТЯ - повернення випромінювання об'єктом без зміни частот складових його монохроматичних випромінювань

ПРОПУСКАННЯ - проходження випромінювання через середовище без зміни частот його окремих складових монохроматичних випромінювань

ПРОЗОРІСТЬ - величина, що характеризує, яку саме частину світла пропускає середовище без зміни напрямку його розповсюдження. Визначається відношенням світлового потоку (потоку випромінювання), який пройшов у середовищі шлях, що дорівнює одиниці довжини, без зміни напряму, до світлового потоку (потоку випромінювання), який ввійшов у це середовище в вигляді паралельного пучка

Терміни і визначення

РОЗСІЯННЯ - зміна просторового розподілу пучка променів, що відхиляються у різних напрямках поверхнею або середовищем без зміни частот складових його окремих складових монохроматичних випромінювань

РОЗСІЯННЯ КОЕФІЦІЄНТ - в оптиці - відношення світлового потоку (потоку випромінювання), яке розсіюється даним тілом, до падаючого на нього світлового потоку (потоку випромінювання)

РОЗСІЯННЯ ПОКАЗНИК - в оптиці - величина, обернена відстані, на якій світловий потік (потік випромінювання) в вигляді паралельного пучка променів послаблюється за рахунок розсіяння світла в середовищі в 10 (десятковий Р. п.) або в *e* (натуральний Р. п.) разів. Р. п. істотно залежить від частоти вхідного оптичного випромінювання

РОЗСІЯННЯ СВІТЛА - зміна будь-яких характеристик потоку оптичного випромінювання (світла), що розповсюджується в неоднорідному середовищі, в результаті взаємодії з частинками речовини. Такими характеристиками можуть бути: розподіл інтенсивності, частотний спектр і поляризація світла

Взаємодія випромінювання з речовиною

механізм взаємодії	фізична основа взаємодії	приклад
геометричні механізми і фізична оптика	дисипативна рефракція, розсіювання, відбиття, інтерференція, дифракція	хроматична аберація, радуга, шорсткі поверхні, відображення, відбиваючі поверхні, плівки на водній поверхні, рідкі кристали, опали
збудження вібраційних механізмів	молекулярні вібрації, іонні вібрації	вода, оксиди алюмінію і кремнію, гідроксильні іони
збудження електронних механізмів	реакція кристалічних решіток під впливом домішок металів, зміни електронних орбіт, реакція сукупних хімічних зв’язків, енергетичні переходи в матеріалах	неорганічні пігменти, деякі флуоресцентні матеріали, осадкові породи, магнетит, сапфір, рослинні пігменти, метали, напівпровідники

Терміни і визначення

АБЕРАЦІЇ - перекручення (спотворення) спектрального відгуку та/або зображень, що формуються оптичними системами.

Проявляються у тому, що оптичні зображення не зовсім чіткі, не точно відповідають об'єктам (**геометричні аберації**) або виявляються зафарбованими (**хроматичні аберації**).

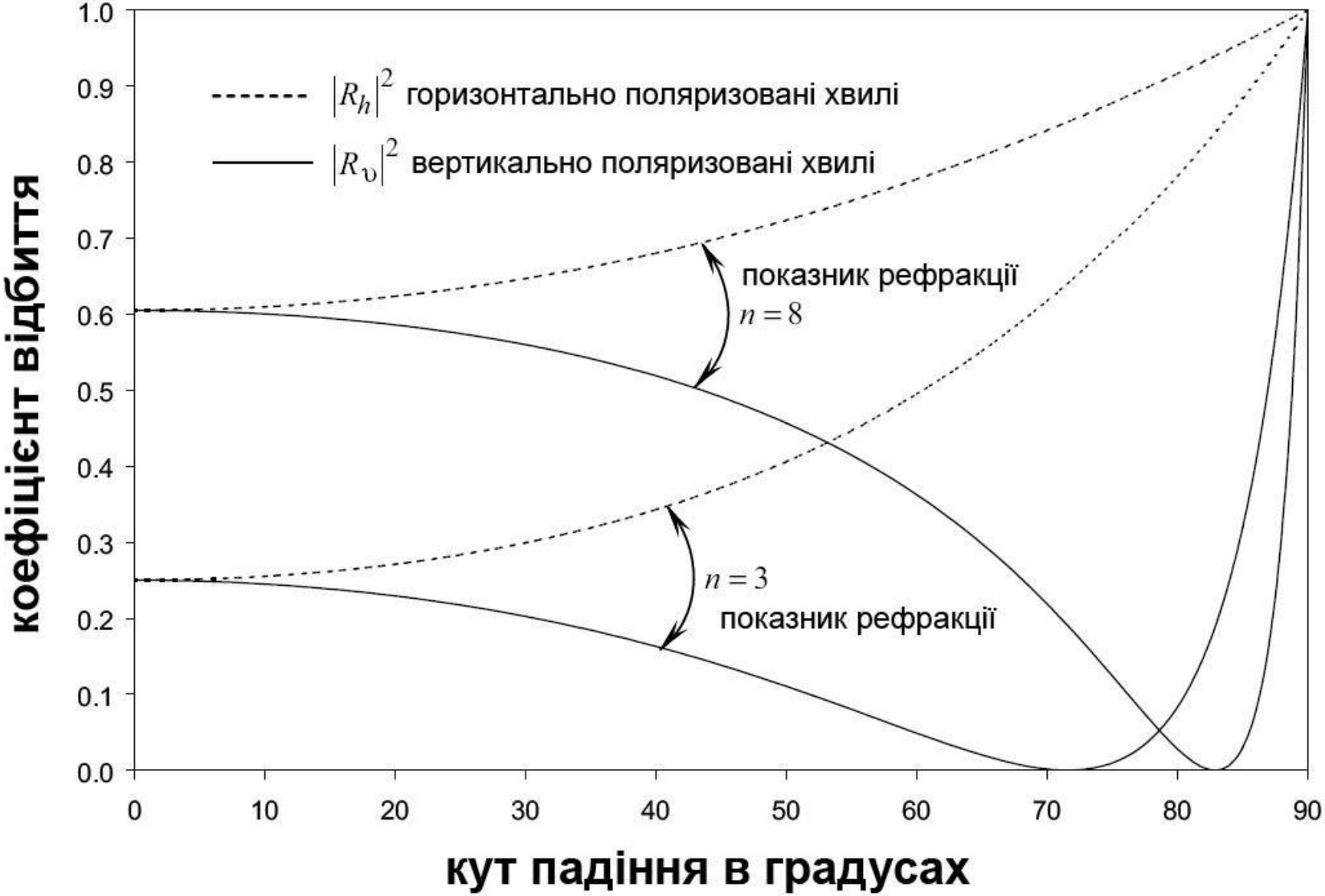
Хроматична аберація пов’язана з залежністю показника заломлення оптичного середовища від довжини хвилі світла. Наявність хроматичних аберацій може приводити до: зображення предметної точки, які утворюються в промінях різних довжин хвиль, відтворюються в різних місцях вздовж оптичної вісі (**хроматизм положення**); зображення позавісьових точок, створені оптичною системою в промінях різних довжин хвиль, розташовуються на різних відстанях від оптичної вісі (**хроматизм збільшення**); виникає помилка в зображенні вісьової точки, яке утворюється реальними промінями різних довжин хвиль внаслідок того, що сферична аберація в промінях з різними довжинами хвиль не однакова (**сферохроматична аберація**)

Терміни і визначення

ДИФРАКЦІЯ - відхилення напрямку розповсюдження випромінювання біля границі просторової апертури (непрозорої перешкоди), її огинання, яке не може бути з'ясовано в межах понять геометричної оптики. Явище Д. обумовлено хвильовою природою випромінювання і пояснюється законами хвильової оптики. При Д. відбуваються амплітудні або фазові порушення хвильового фронту випромінювання. Явище Д. найвиразніше проявляється, коли довжина хвилі випромінювання порівнянна з розмірами перешкоди

РЕФРАКЦІЯ СВІТЛА - Викривлення напрямків поширення світла у середовищі зі зміною показника заломлення у просторі

Відбиття від поверхні



Відбиття від поверхні

Коефіцієнти поглинання для горизонтально і вертикально поляризованих хвиль

$$\left|R_h\right|^2 = \frac{\sin^2(\theta - \theta_t)}{\sin^2(\theta + \theta_t)} \qquad \left|R_v\right|^2 = \frac{\tan^2(\theta - \theta_t)}{\tan^2(\theta + \theta_t)}$$

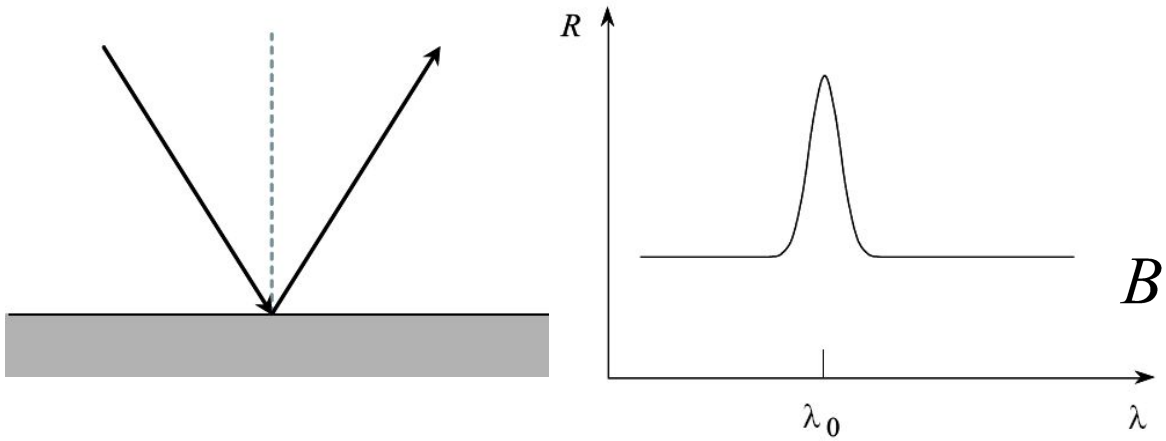
θ – кут падіння, θ_t – кут поглинання, *n* - показник рефракції

$$\sin\theta_t = n\sin\theta \qquad \tan\theta = n \qquad n = N_r + iN_i$$

Для вертикального огляду:

$$R_h = R_v = R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right) = \left(\frac{N_r + iN_i - 1}{N_r + iN_i + 1}\right) \qquad \left|R\right|^2 = \frac{\left(N_r - 1\right)^2 + N_i^2}{\left(N_r + 1\right)^2 + N_i^2}$$

Відбиття від поверхні

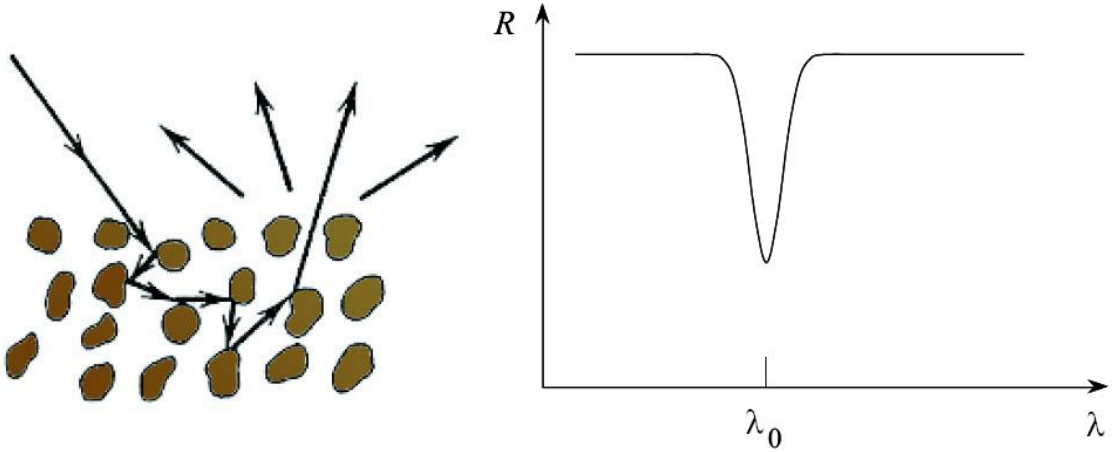


Відбивна здатність поверхонь (поверхнева яскравість) описується:

$$B\cos\theta_s = B_0(\cos\theta_i \cos\theta_s)^k$$

B – яскравість об'єкту, *B0* – яскравість ідеального відбивача, *θi* – кут падіння, *θs* – кут розсіювання, *k* – емпіричний коефіцієнт затемнення

Відбиття від рівних поверхонь



відповідний закон для квазіідеальних (ламбертових) поверхонь:

$$B = B_0 \cos\theta_i$$

Відбиття від шорстких поверхонь

Глибина проникнення випромінювання

В абсорбуючому середовищі показник рефракції пов'язаний з електромагнітними властивостями і може бути представленим через хвильовий вектор:

$$\sqrt{\varepsilon_r} = n = N_r + iN_i \qquad k = \sqrt{\varepsilon_r}k_0 = N_r k_0 + iN_i k_0$$

$$k_0 = {2\pi}/{\lambda}$$

$$E = A \cdot e^{i(N_r k_0 + iN_i k_0)r - i\omega t} = E_0 \cdot e^{-N_i k_0 r}$$

Глибина проникнення випромінювання в середовище:

$$d = \frac{1}{N_i k_0} = \frac{\lambda}{4\pi N_i}$$

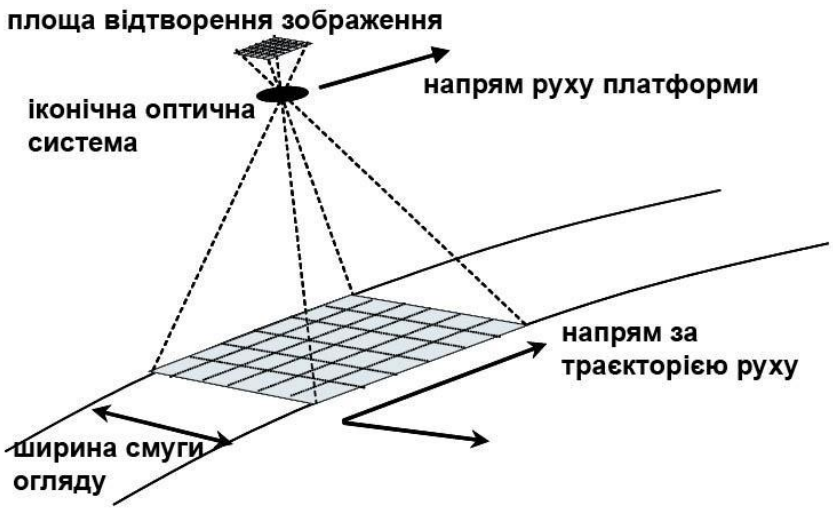
Реєстрація сигналу

Загальна енергія *E*r, яку отримує сенсор з елементу поверхні *A*, що знаходиться на відстані *r* від сенсору, за час спостереження (сканування) *τ*, в смузі хвиль *Δλ* (від *λ1* до *λ2*) з центральною довжиною смуги *λ0* описується рівнянням:

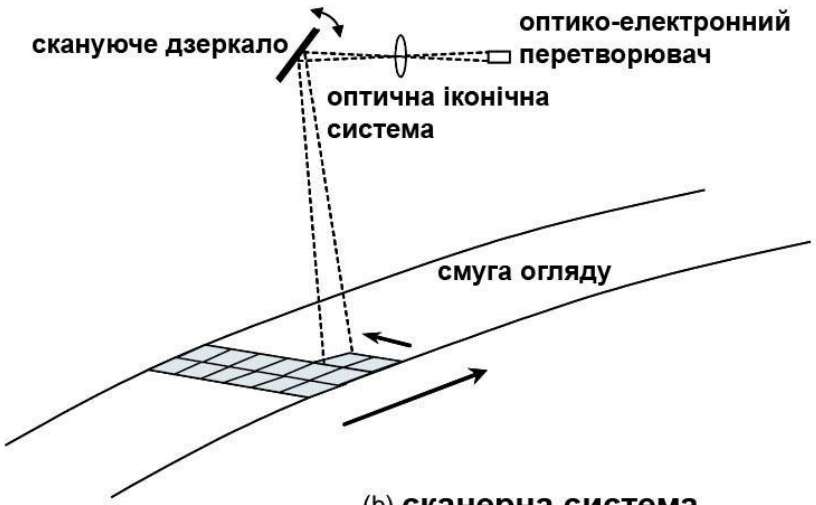
$$E_r = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda, T_s)\left(\frac{R_s}{d}\right)^2 a^2(\lambda)\frac{\rho(\lambda)dSdA}{2\pi r^2}h(\lambda)\tau d\lambda$$

h(λ) – функція передачі модуляції сенсору, *a(λ)* – функція передавання атмосфери, *S(λ,Ts)* – випромінювання ідеального випромінювача з температурою *Ts*, розміром *Rs* на відстані *d*, *ρ(λ)* – розподіл поверхневого випромінювання об’єкту (альбедо)

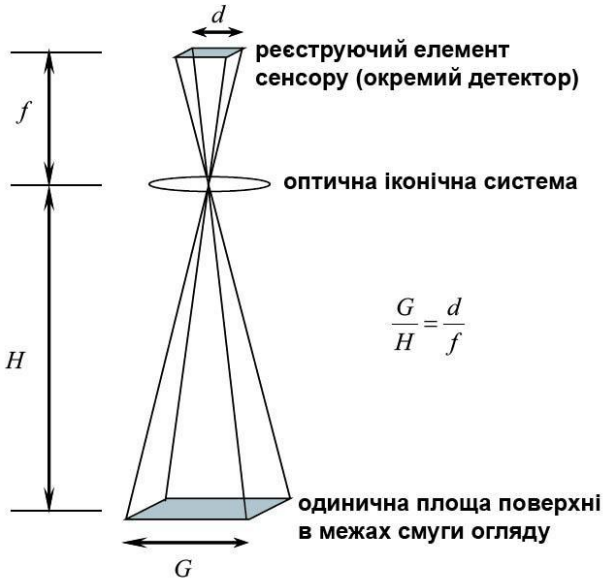
Засоби реєстрації сигналу

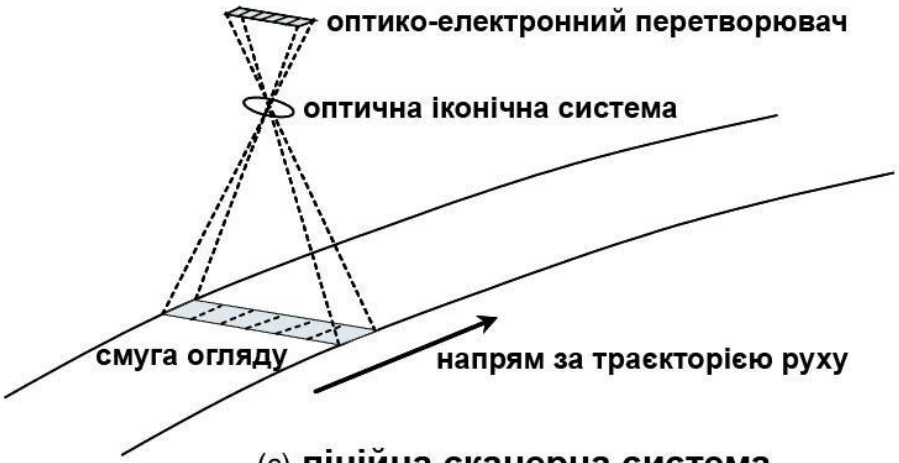


(a) **кадрова камера**



(b) **сканерна система**





(c) **лінійна сканерна система**

Порівняльна характеристика наявних сенсорів

Знімальна система сенсорів Thematic Mapper (TM/ETM) супутників Landsat

Band number	Spectral range (μm)	Spatial resolution (m)	Quantization levels (bits)
1	0.45–0.52	30	8
2	0.53–0.61	30	8
3	0.63–0.69	30	8
4	0.78–0.9	30	8
5	1.55–1.75	30	8
6	10.4–12.5	60	8
7	2.09–2.35	30	8
8	0.52–0.9	15	8

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)

Subsystem	Band no.	Spectral range (μm)	Spatial resolution (m)	Quantization levels (bits)
VNIR	1	0.52–0.60	15	8
	2	0.63–0.69		
	3N	0.78 0.86		
	3B	0.78–0.86		
SWIR	4	1.60–1.70	30	8
	5	2.145–2.185		
	6	2.185–2.225		
	7	2.235–2.285		
	8	2.295–2.365		
	9	2.360–2.430		
TIR	10	8.125–8.475	90	12
	11	8.475–8.825		
	12	8.925–9.275		
	13	10.25–10.95		
	14	10.95–11.65		

Схема пристрою реєстрації оптичного сигналу

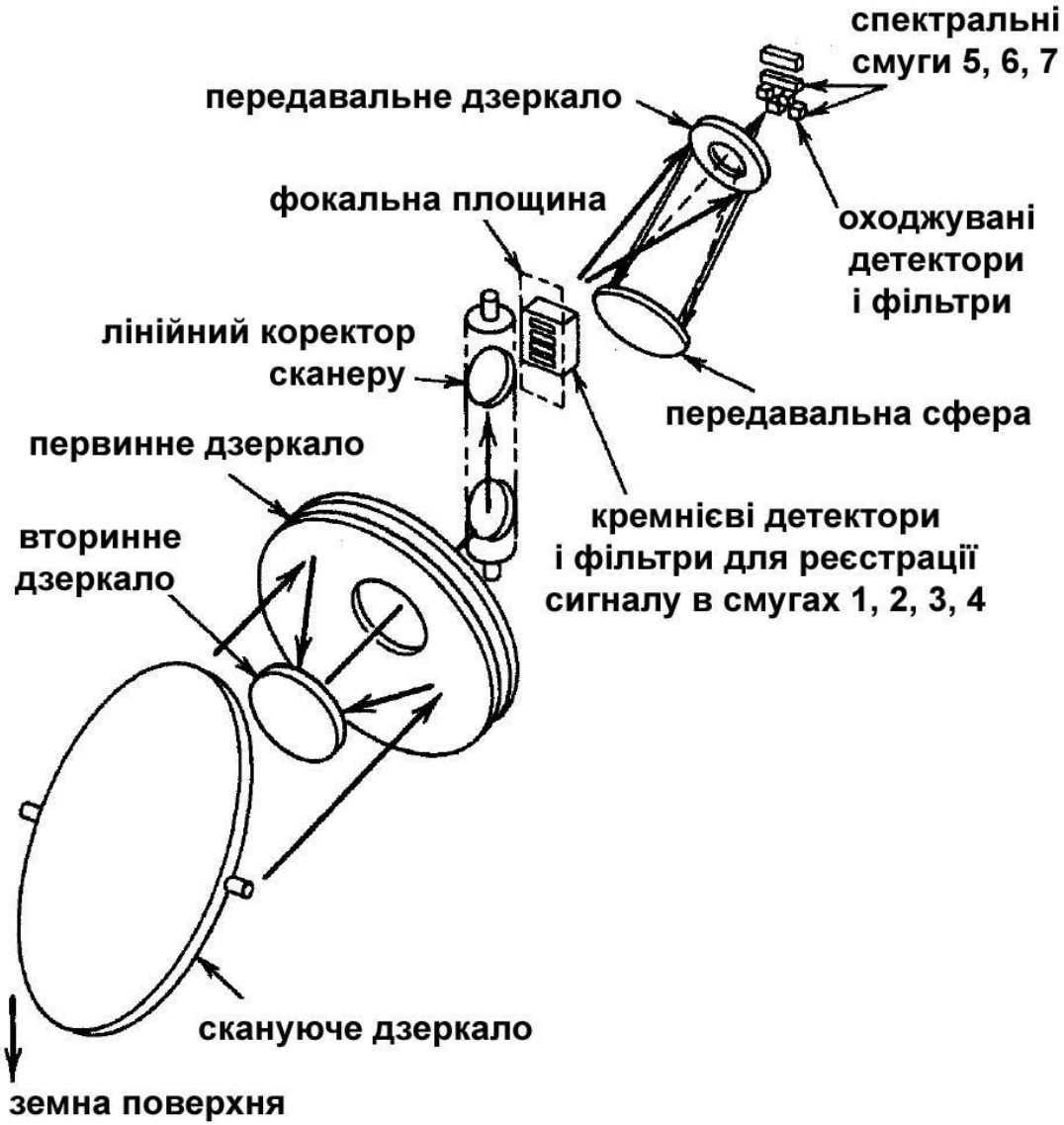


Схема зондування супутника Landsat

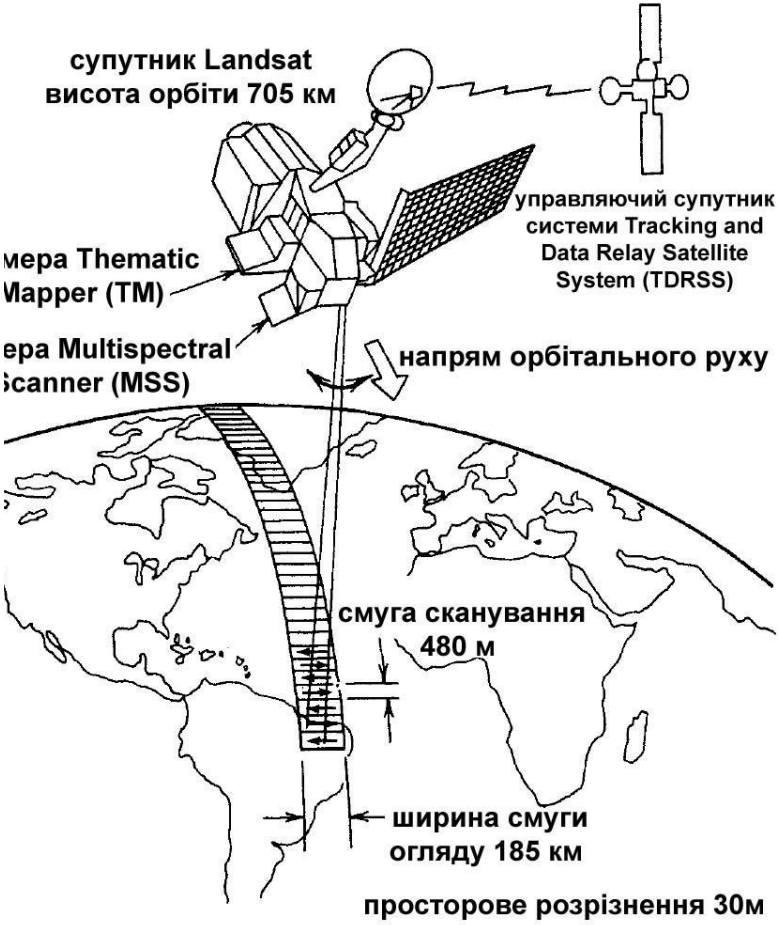
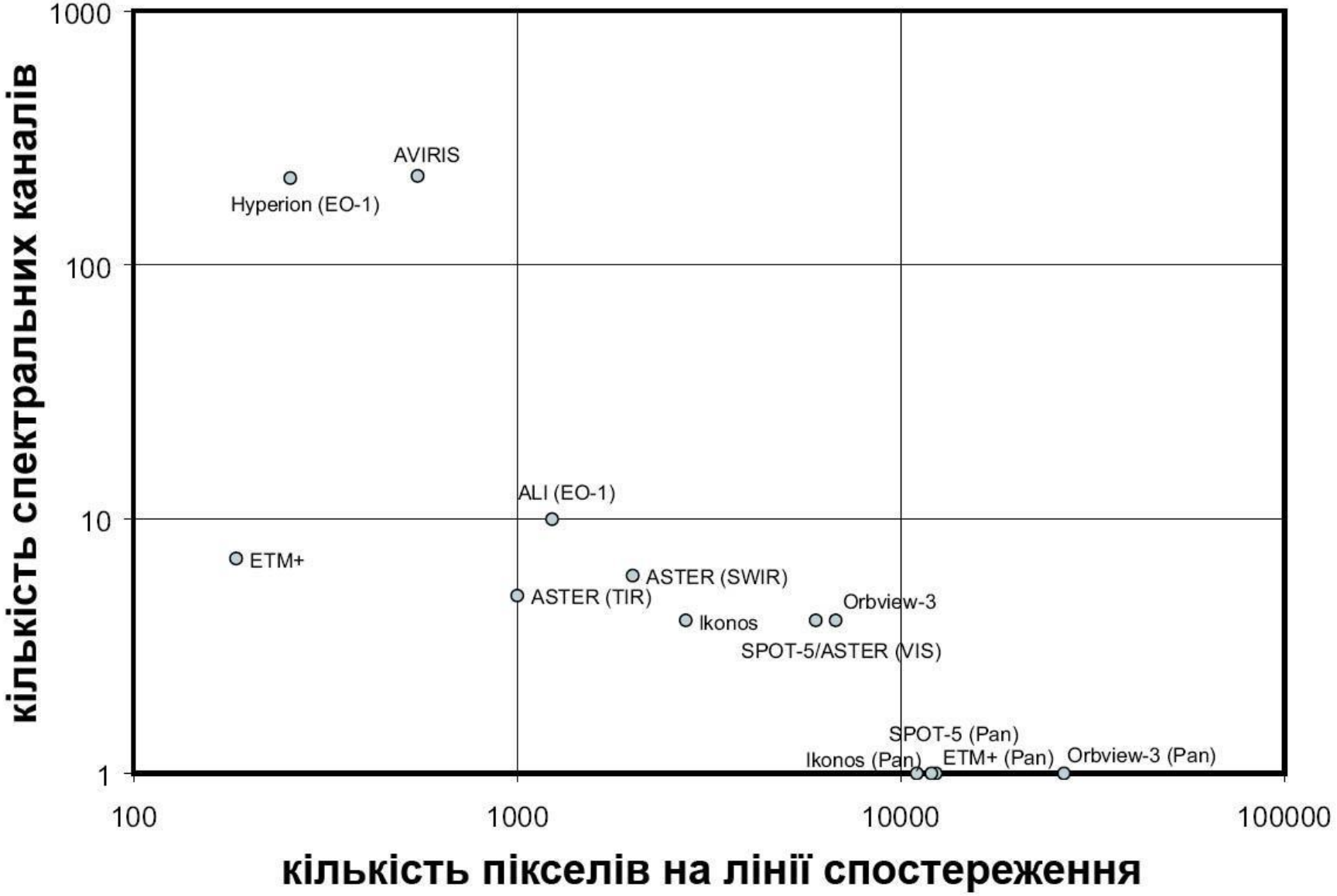


Схема скануючого пристрою сенсору Thematic Mapper (TM) супутників Landsat

Порівняльна характеристика наявних сенсорів



Порівняльна характеристика наявних сенсорів

Type	Advantage	Disadvantage
Film framing camera	Large image format High information density Cartographic accuracy	Transmission of film Potential image smearing Wide field of view optics
Electronic framing camera	Broad spectral range Data in digital format Simultaneous sampling of image, good geometric fidelity	Difficulty in getting large arrays or sensitive surface Wide field of view optics
Scanning systems	Simple detector Narrow field-of-view optics Wide sweep capability Easy to use with multiple wavelengths	Low detector dwell time Moving parts Difficult to achieve good image, geometric fidelity
Pushbroom imagers	Long dwell time for each detector Across-track geometric fidelity	Wide field-of-view optics