

Prezentare curs “Găuri Negre” (Black Holes)

Universitatea din Alberta (Canada)

Partea I-a

Cristian Stancu – Astroclubul București

Radiația electromagnetică

Unda este fenomenul de propagare a unei oscilații într-un mediu material sau spațiu și care este însoțit de transport de energie.

După modul de oscilație a particulelor mediului față de direcția de propagare se deosebesc două tipuri fundamentale de unde:

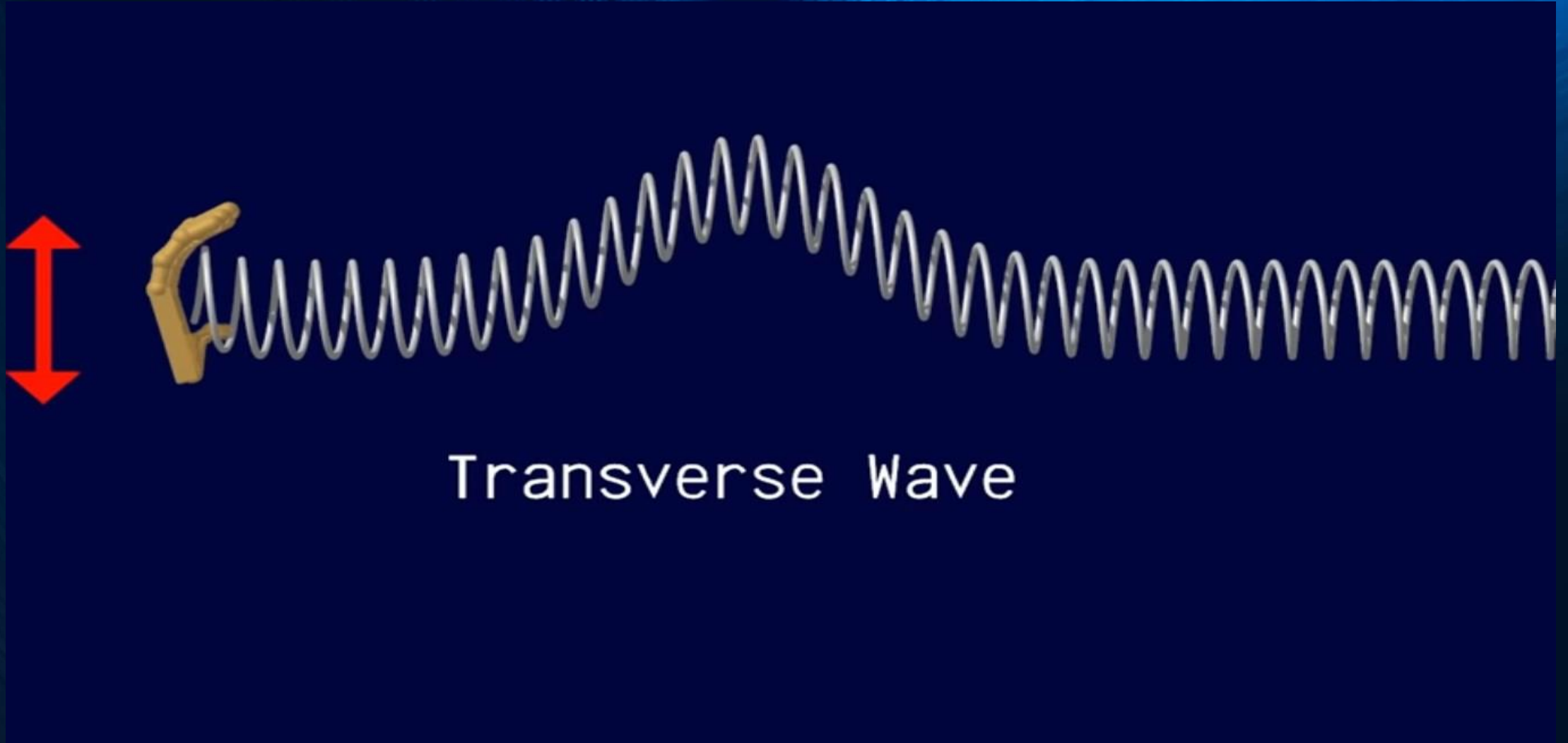
- - Undele longitudinale sunt unde în care deplasarea mediului este în aceeași direcție sau în direcția opusă direcției de propagare a undelor (sunt denumite și unde de compresie);
- - Undele transversale sunt unde care oscilează perpendicular pe direcția propagării.

Unde longitudinale (de ex. undele sonore)



Longitudinal Wave

Unde transversale



Transverse Wave

Radiația electromagnetică

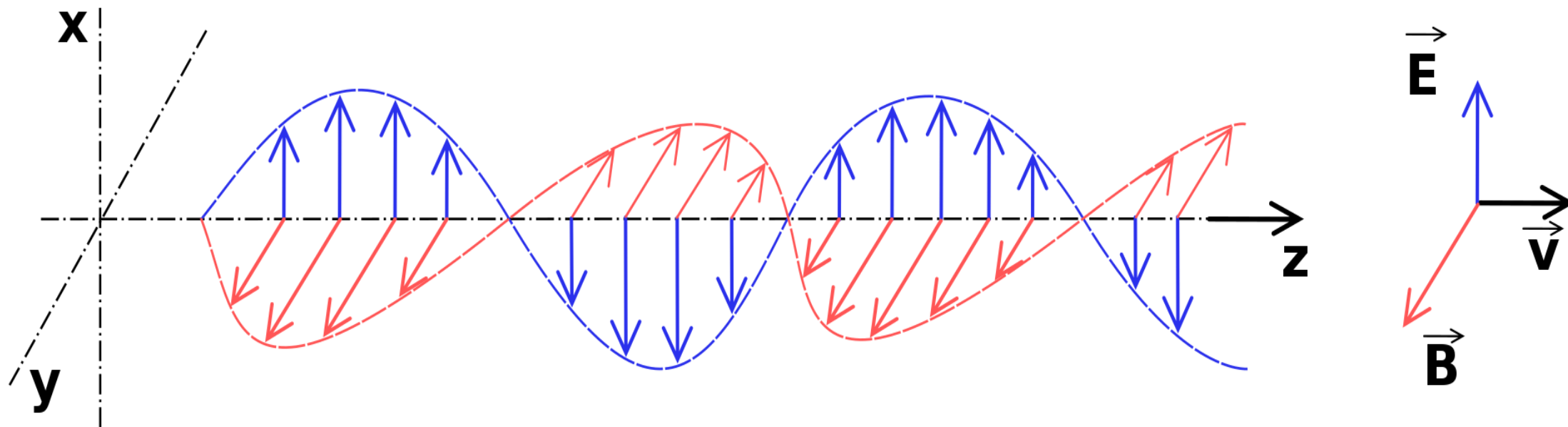
Radiația electromagnetică (undele electromagnetice) este un tip de unde transversale constând în oscilația sincronizată a unui câmp electric și a unui câmp magnetic.

Undele electromagnetice au fost prezise teoretic de ecuațiile lui Maxwell și apoi descoperite experimental de Heinrich Hertz.

Variația unui câmp electric produce un câmp magnetic variabil, căruia îi transferă în același timp și energia.

La rândul ei, energia câmpului magnetic variabil creat, generează un câmp electric care preia această energie. În acest fel energia inițială este transformată alternativ și permanent dintr-o formă (electrică în magnetică și invers) în cealaltă, iar procesul se repetă ducând la propagarea acestui cuplu de câmpuri.

Radiația electromagnetică (unde electromagnetice)



Radiația electromagnetică

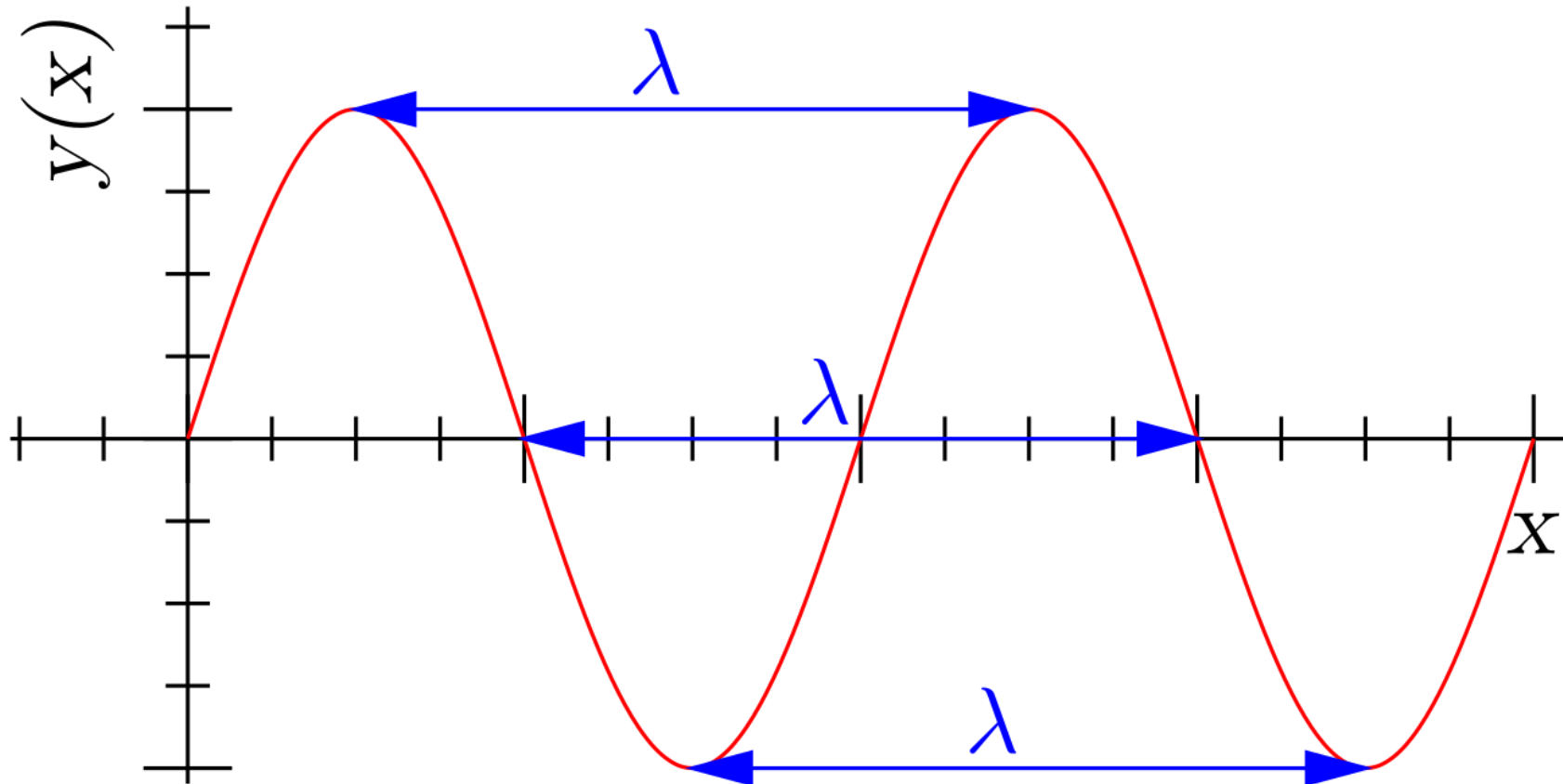
Oamenii de știință folosesc termenul de radiație electromagnetică pentru a descrie lumina sau undele de lumină.

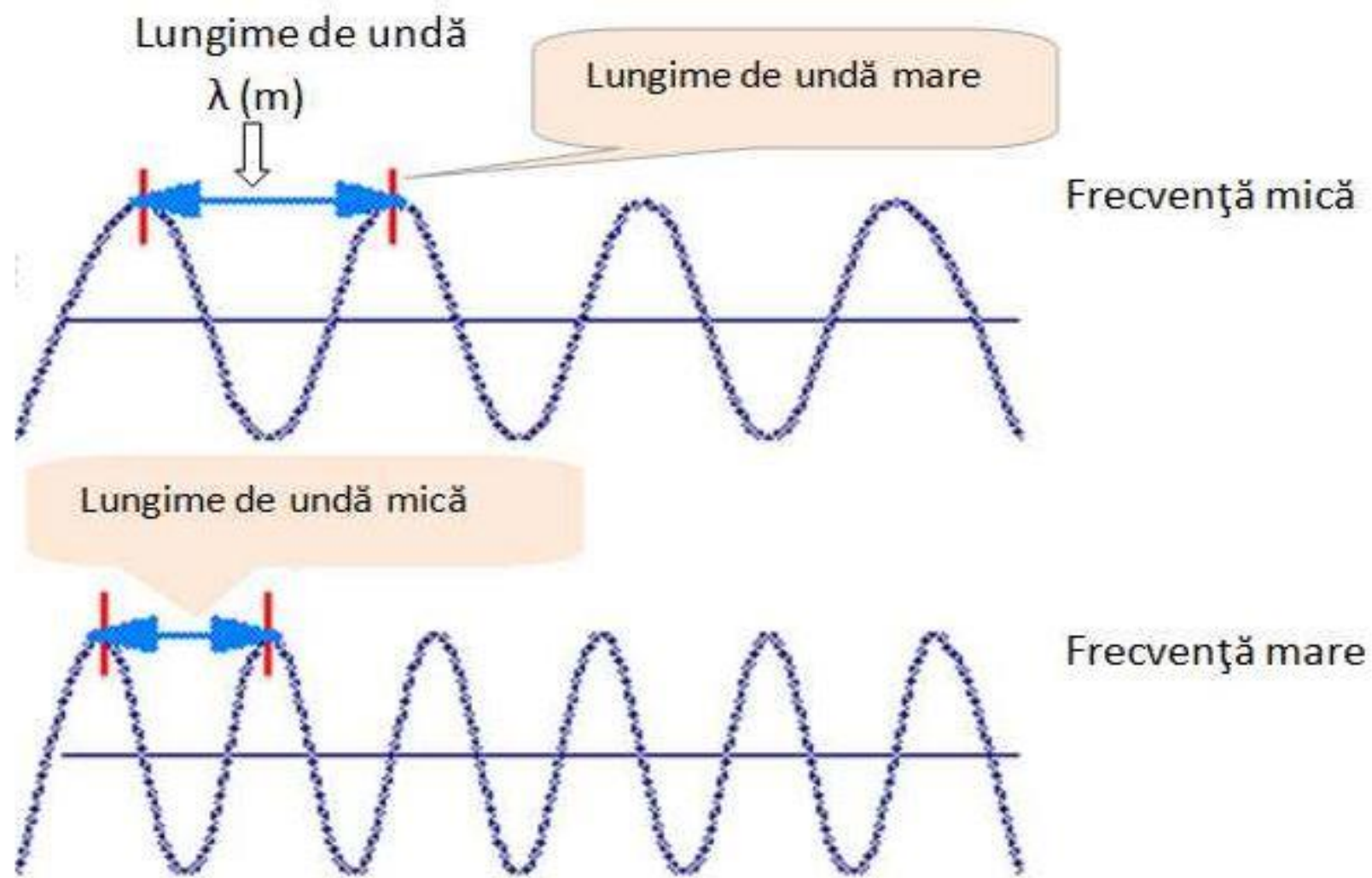
Undele luminoase sunt caracterizate de trei parametri:

- a) - lungimea de undă λ ;
- b) - frecvența f (inversul perioadei T) – nr. de oscilații în unitatea de timp;
- c) - viteza de propagare c – viteza luminii.

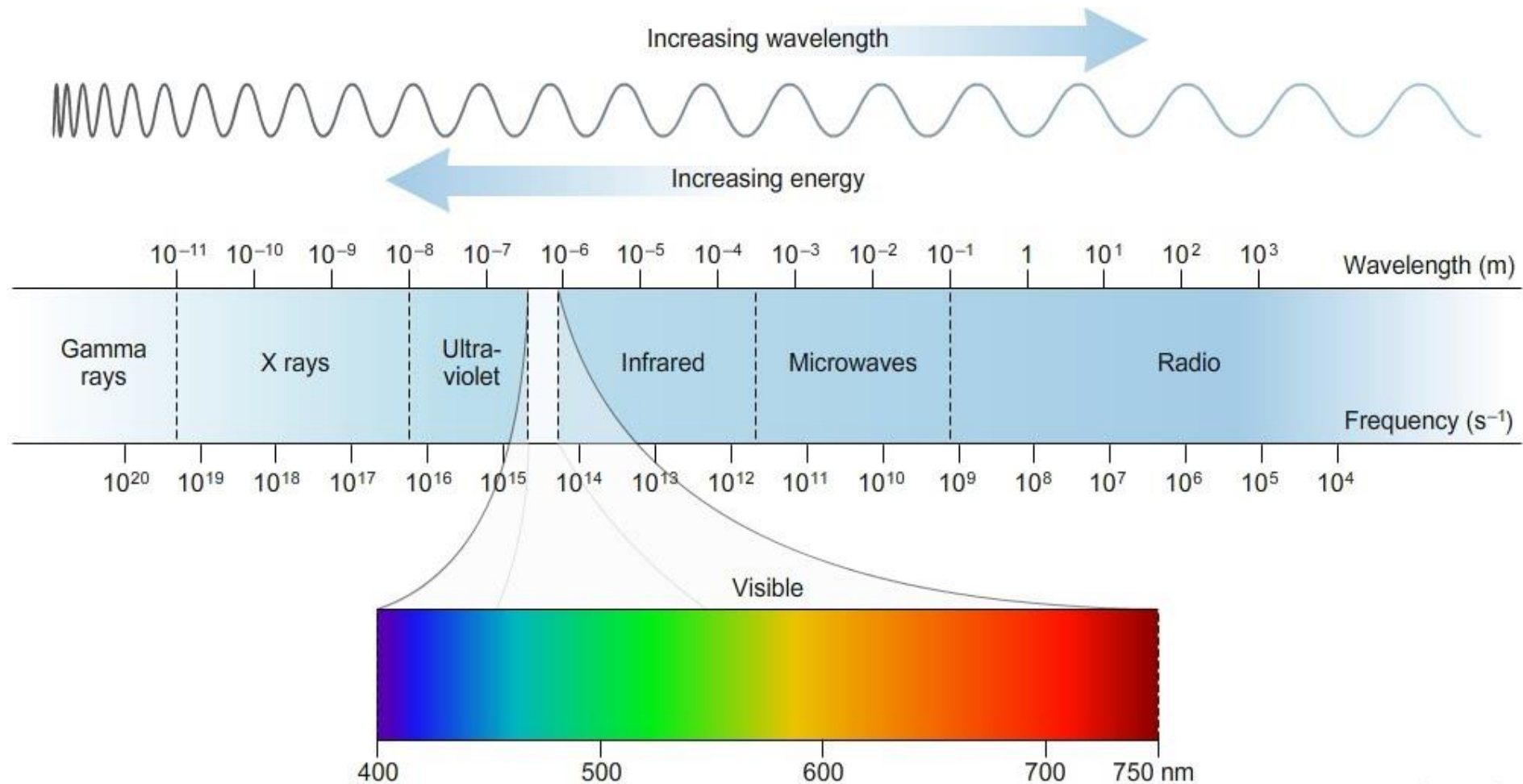
$$c = \lambda f = \lambda / T$$

Radiația electromagnetică: lungimea de undă λ





Spectrul radiației electromagnetice



Introducere în mecanica cuantică

Povestea mecanicii cuantice începe cu adevărat la sfârșitul secolului al 19-lea. La acel moment oamenii de știință credeau că proprietățile luminii au fost înțelese în întregime, anume că lumina vizibilă este o manifestare a undelor electromagnetice.

Lumina a fost demonstrată în experimente ca fiind o undă corespunzătoare câmpurilor electrice și magnetice variabile.

Era însă o problemă: descrierea undelor luminoase ca undă nu descria corect lumina emisă de obiectele fierbinți, o emisie cunoscută sub numele de radiația corpului negru.

Teoria luminii creată în anii 1800 prezicea un spectru greșit al culorilor radiației corpului negru.

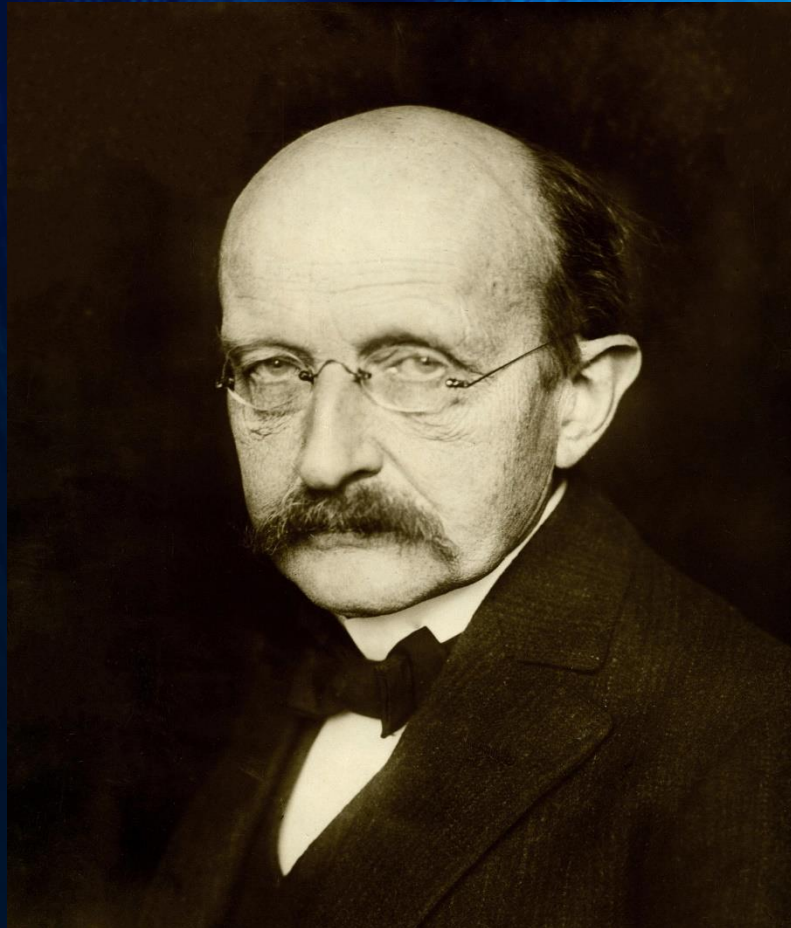
Introducere în mecanica cuantică

Teoria prezicea că frecvența luminii crește atunci lumina devine din ce în ce mai intensă, contribuind tot mai mult la spectru. Acest lucru era eronat deoarece rezulta emiterea unei cantități infinite de energie.

Problema energiei presupuse a fi infinită emisă de corpurile negre a ajuns să fie cunoscută sub numele de Catastrofa Ultravioletă (Ultraviolet Catastrophe) și a reprezentat o mare problemă pentru teoreticienii din epocă.

În 1899, Max Planck a propus o teorie care rezolva problema energiei infinite emise de corpurile negre prin introducerea unei noi idei.

Introducere în mecanica cuantică



Max Planck (1858-1947)

Introducere în mecanica cuantică

Undele electromagnetice pot transporta doar o cantitate specială de energie numită cuantă, în loc de cantitate arbitrară de energie. Aceasta a fost cheia pentru a explica de ce energia emisă de un bec sau de orice alt obiect fierbinte nu este infinită.

Noile ecuații dezvoltate de Planck au fost baza matematică pentru rezolvarea catastrofei ultraviolete.

Ele descriu în mod corect proprietățile de culoare și emisie de energie (emisii spectrale) ale corpului negru.

Un principiu de bază al mecanicii cuantice este postulatul lui Planck, anume că energia particulelor oscilatorii ale unui corp negru este un multiplu întreg n al unei unități de energie.

Introducere în mecanica cuantică

Postulatul lui Planck

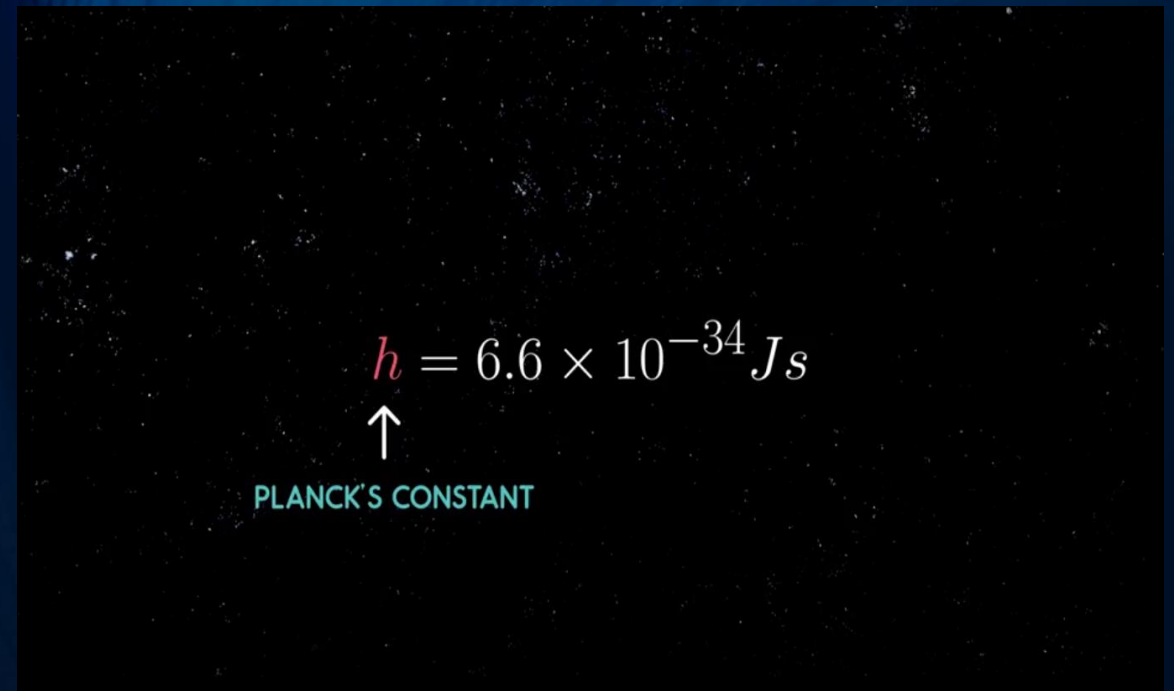
$$E = n \times hf$$

Unde:

n = un nr. întreg (1, 2, 3, etc.);

h = constanta lui Planck;

f = frecvența oscilației.



Introducere în mecanica cuantică

Albert Einstein a realizat că constanta lui Planck implică o realitate fizică nouă, că lumina poate fi considerată ca o particulă.

Într-o lucrare publicată în 1905, Einstein a arătat că particulele de lumină sau fotoni vin în unități numite cuante, unde o anumită cantitate de energie este legată de fiecare culoare a luminii.

Dacă avem lumină de o anumită culoare, știm lungimea de undă și frecvența acesteia.

Einstein a introdus o ecuație simplă pentru energia unui foton de acea culoare:

$$E = hf$$

Introducere în mecanica cuantică

De reținut:

- Energia fotonilor E , lungimea de undă λ și frecvența f pot fi considerate ca modalități echivalente de a descrie lumina;
- Aceasta este aceeași cu a spune că lumina este cuantizată, fiecare foton este un mic “pachet” discret de energie;
- Energia unui foton este legată de lungimea de undă și frecvența sa și prin urmare de culoarea sa;
- Cu un fascicul de lumină, există trilioane de fotoni, fiecare cu propria lor energie;
- Energia pe care un foton o poartă este proporțională cu frecvența sa și invers proporțională cu lungimea de undă.

Introducere în mecanica cuantică

Ce este interesant despre lumină este că poate fi descrisă în două moduri, având proprietățile unei unde dar și a unei particule. Descrierea luminii în aceste două moduri se numește dualitatea lumină-particulă a luminii.

De fapt, nu suntem doar capabili să descriem fotoni, ci toate particulele fundamentale, atât ca particule cât și ca unde. Dualitatea undă-particulă este una din ideile fundamentale ale mecanicii cuantice.

Pentru descoperirea cuantelor de energie Max Planck a primit premiul Nobel în Fizică în anul 1918.

Introducere în mecanica cuantică

Acum se știe că materia este responsabilă pentru crearea fotonilor. Producerea luminii intră în două categorii majore:

- incandescența;
- luminescența.

Incandescența este producerea de lumină de către orice corp care conține energie termică, energia vibrațiilor.

Principiul științific al radiației corpului negru explică modul în care fotonii sunt creați prin vibrațiile intense ale atomilor și electronilor la temperaturi ridicate.

Introducere în mecanica cuantică

Teoria radiației corpului negru descrie modul în care oscilația atomilor din obiecte creează unde luminoase.

Atomii și electronii care se împrăștiie înainte și înapoi ca urmare a vibrațiilor termice sau a căldurii acționează ca emițătoare mici, creând câmpuri electromagnetice oscilante.

Această mișcare a câmpului electromagnetic poate fi înfășurată într-un “pachet” mic, pur și simplu numit un foton.

Introducere în mecanica cuantică

Luminescența este producția de lumină prin tranziții atomice, care mai sunt denumite uneori și radiații ale corpului rece (de ex.: fluorescența, electroluminescența, chemoluminescența, bioluminescența, etc.).

Într-un model planetar al unui atom, electronii se mișcă pe orbite în jurul nucleului.

Când un electron sare de la o orbită la alta, emite sau absoarbe un foton de energie specifică pentru a face acest lucru.

Efectul Doppler al undelor



Christian Doppler (1803 – 1853)

Efectul Doppler al undelor

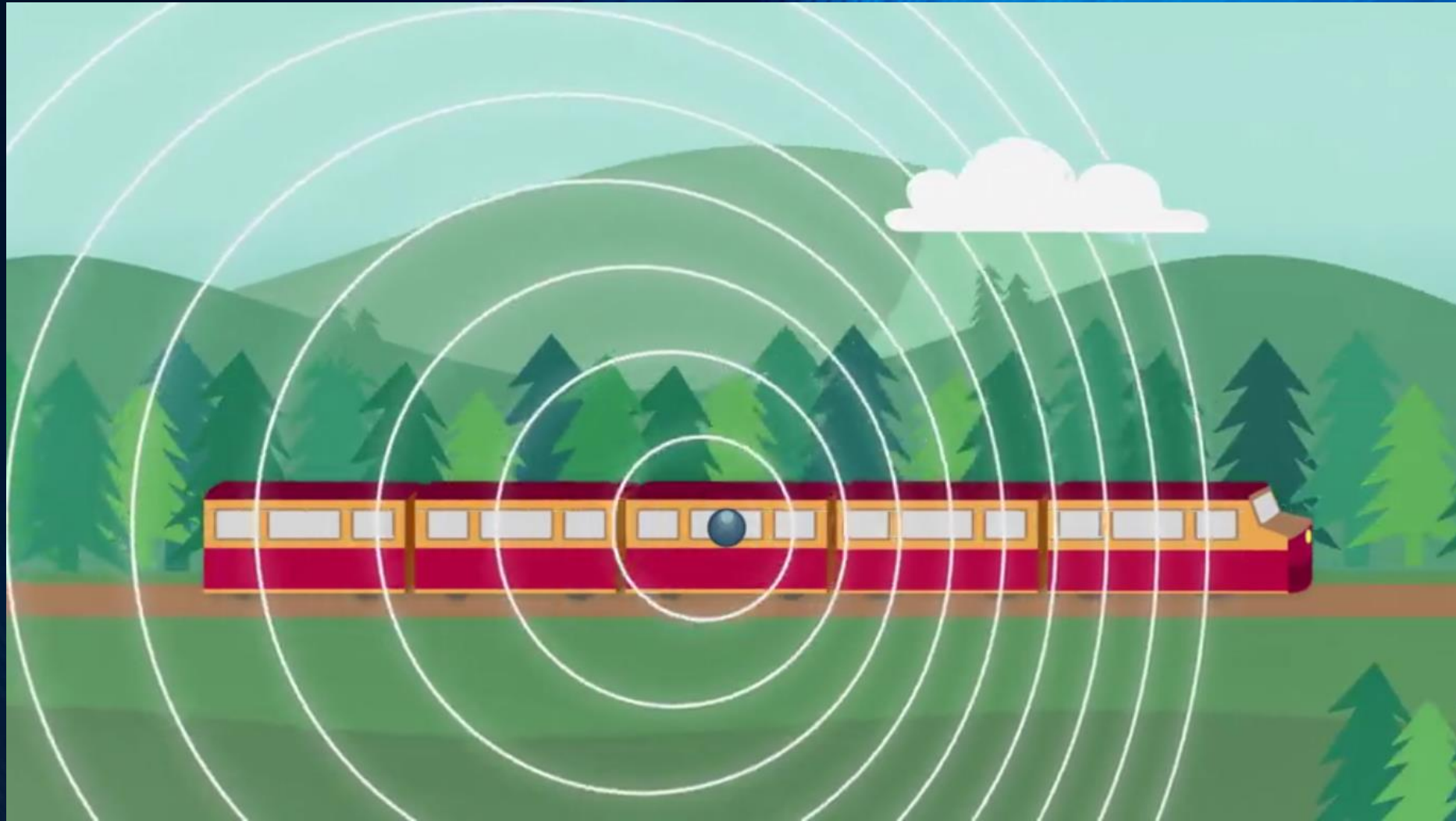
Efect explicat pentru prima dată de matematicianul și fizicianul austriac Christian Doppler în anul 1842 și independent de către Hippolyte Fizeau în 1848.

În lucrarea intitulată „Despre lumina colorată a stelelor binare și a altor stele de pe bolta cerească”, Doppler și-a prezentat teoria conform căreia frecvența observată a unei unde depinde atât de lumina emisă, cât și de viteza relativă a sursei și a observatorului.

Dar ce înseamnă asta? Dacă revenim la undele sonore pentru un moment, putem folosi o analogie din realitate.

Efectul Doppler al undelor

(vezi video "Doppler Shift")



Efectul Doppler al undelor

Pe măsură ce un tren sau o ambulanță se apropie de receptor, undele acustice (sonore) din fața trenului se comprimă, lungimea de undă pe care receptorul o va auzi va fi mai mică (vezi video "Doppler Shift").

Lungimile de undă mai mici corespund frecvențelor mai mari/mai înalte și tonul sunetului va fi mai acut (ascuțit).

Acum, dacă ne uităm la undele din spatele trenului, vedem că, pe măsură ce vehiculul se îndepărtează, undele par a fi mai răspândite.

Această întindere aparentă are ca rezultat lungimi de undă mai mari sau frecvențe mai mici/mai joase și tonul sunetului va fi mai grav.

Deplasarea spre roșu sau albastru a luminii (redshift sau blueshift)

Această înălțare și coborâre a tonului undelor acustice este cunoscută sub numele de efectul Doppler (în Franța efectul se numește și Doppler-Fizeau) și se aplică și luminii. Deoarece lumina este emisă de la o sursă, undele emise pot fi comprimate sau întinse de-a lungul direcției de mișcare.

Deci, dacă o stea se îndreaptă spre noi, undele de lumină care se deplasează în fața stelei apar ca fiind cu frecvență mare sau lungime de undă mică. Aceasta se traduce ca o deplasare către capătul albastru al spectrului electromagnetic.

Dimpotrivă, pe măsură ce steaua se îndepărtează de noi, undele luminoase par a fi întinse, rezultând lungimi de undă mai lungi și steaua apare mai roșie.

Deplasarea spre roșu sau albastru a luminii

Acest efect nu se limitează la banda vizibilă a spectrului electromagnetic. Atât razele X, cât și undele radio pot fi de asemenea roșii albastre și roșii. Culoarele ne indică doar direcția deplasării.

Multe stele care sunt observate pe cerul de noapte sunt de fapt în sisteme binare de stele.

În astfel de sisteme, vedem stele orbitând una în jurul celeilalte. Dacă vedem o pereche de stele din lateral, va părea că o stea se îndreaptă spre noi, în timp ce cealaltă stea se îndepărtează de noi. Această mișcare relativă este detectată sub formă de deplasare spre culoarea albastru și deplasare spre culoarea roșie pe care le detectăm de la aceste stele.

Deplasarea spre roșu sau albastru a luminii

Același lucru este valabil și pentru galaxii. Galaxiile spirale se deplasează în spirală în spațiu.

Când ne uităm la alte galaxii, putem măsura lumina emisă în diferite puncte de pe disc pentru a deduce viteza de rotație a galaxiilor.

Când se măsoară lumina de la stelele din acea galaxie, vedem o schimbare a luminii către lungimi de undă mai scurte din partea laterală a galaxiei care se apropie de noi, este deplasată spre albastru.

Dacă ne uităm de cealaltă parte a discului, care se îndepărtează de noi, vedem o schimbare a luminii spre lungimi de undă mai lungi, deci o deplasare spre roșu.

Deplasarea spre roșu sau albastru a luminii

Este interesant de remarcat că, în timp ce unul dintre cei mai apropiați vecini M31 sau galaxia Andromeda se rotește, vedem și o deplasare globală a întregii galaxii spre albastru, ceea ce înseamnă că M31 se îndreaptă spre noi.

Deși ideea de galaxii multiple a fost propusă încă din mijlocul anilor 1700, este ciudat să aflăm că conceptul de galaxii este atât de nou. Această idee a fost dovedită în mod concludent cu aproximativ 100 de ani în urmă, până atunci se credea ca toate aceste “nebuloase” fac parte din galaxia noastră.

În 1929, Edwin Hubble a continuat aceste observații și a găsit o relație între distanța și deplasare spre roșu a galaxiilor.

Deplasarea spre roșu sau albastru a luminii



Edwin Hubble (1889-1953)

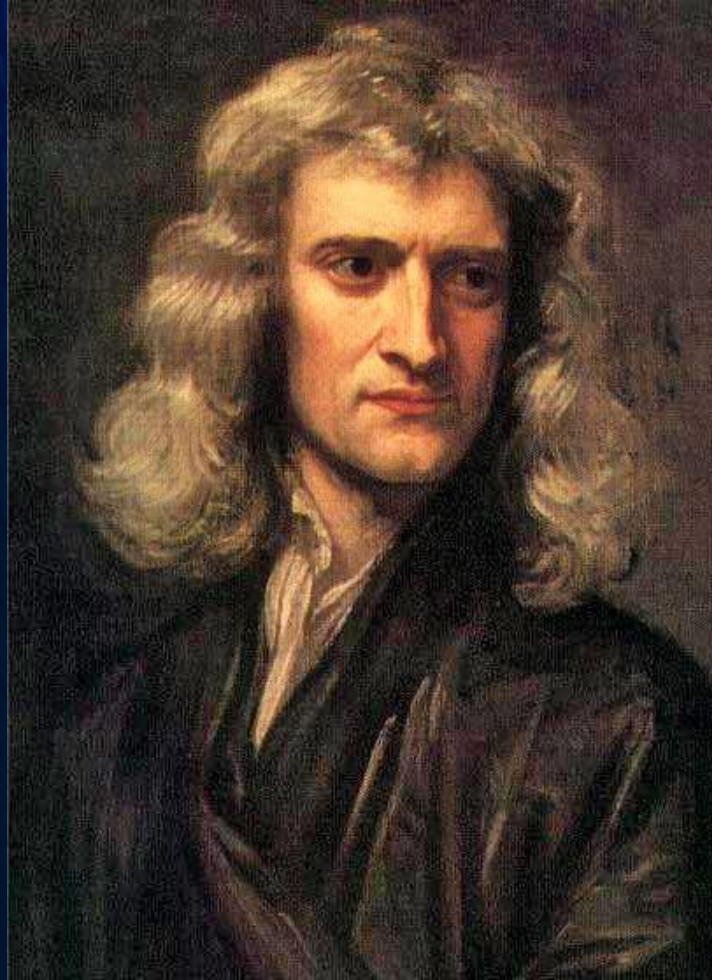
Deplasarea spre roșu sau albastru a luminii

Hubble a descoperit că galaxiile care sunt în afara grupului nostru local de galaxii au lumină deplasată spre roșu. El a observat că, cu cât este mai departe galaxia de la noi, cu atât mai mare este schimbarea lungimii de undă sau cu atât este mai mare deplasarea spre roșu. Dacă schimbarea lungimii de undă este interpretată ca o deplasare Doppler datorată mișcării, atunci observațiile lui Hubble sugerează că galaxiile par să se îndepărteze de noi.

Galaxiile care sunt mai departe de noi se îndepărtează de noi cu o viteză mai mare. Interpretarea modernă a observațiilor lui Hubble este că Universul se extinde, ceea ce face să pară că galaxiile se îndepărtează de noi.

Descrierea expansiunii Universului se numește Teoria Big Bang.

Legea Atracției Universale a lui Newton



Isaac Newton (1643 – 1727)

Legea Atracției Universale a lui Newton

NEWTON'S UNIVERSAL LAW OF GRAVITATION

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

Legea Atracției Universale a lui Newton

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$

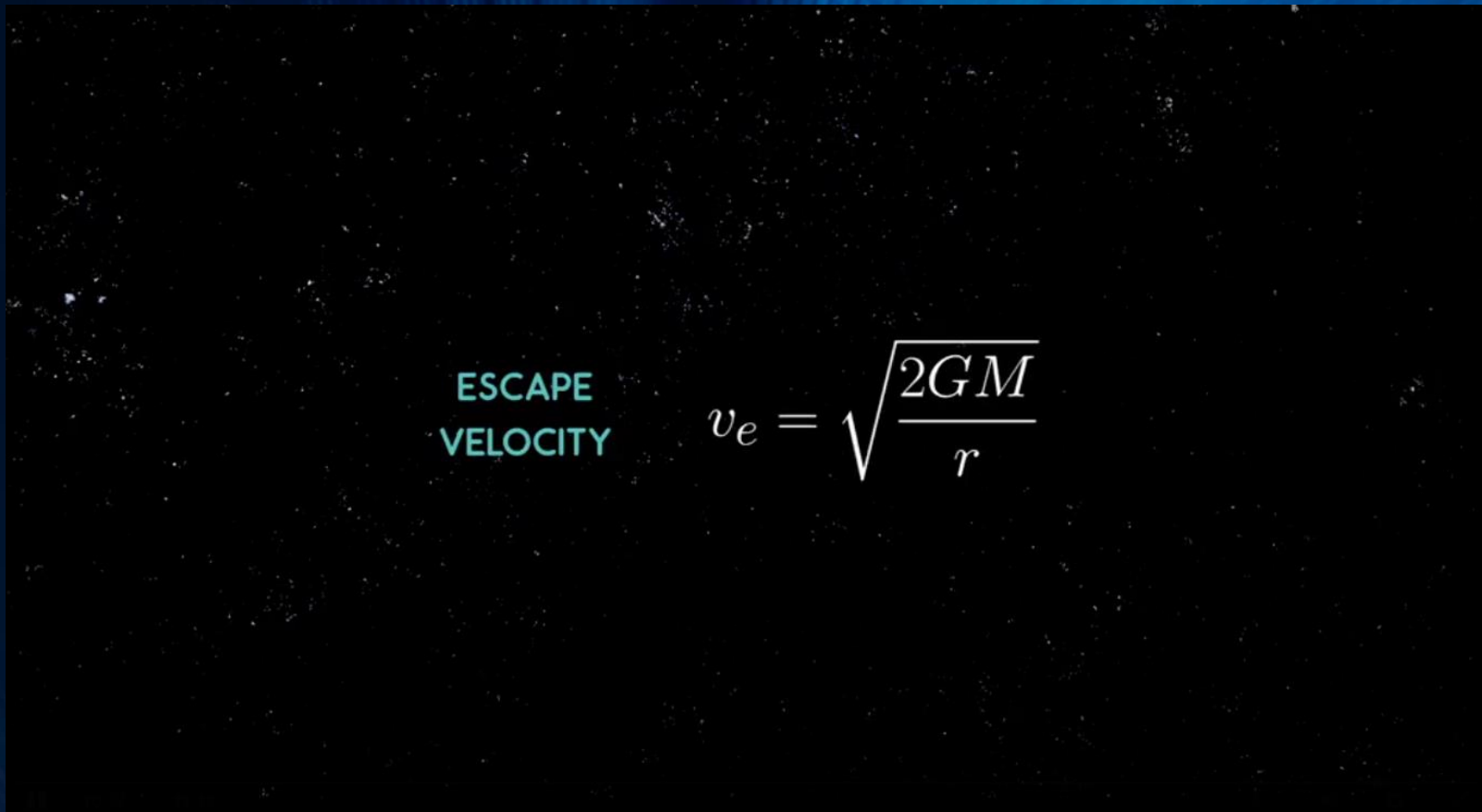
Viteza de scăpare de atracția gravitațională

Aflarea formulei pentru viteza de scăpare este relativ simplă. Energia potențială gravitațională a unui obiect pe suprafața unui corp masiv este egală cu energia sa cinetică.

$$\frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}mv_e^2$$

Viteza de scăpare de atracția gravitațională

Formula pentru viteza de scăpare (de ex. pentru Pământ viteza de scăpare este de 11,2 km/s, cunoscută și ca a doua viteză cosmică):



ESCAPE
VELOCITY

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Viteza de scăpare de atracția gravitațională

Dacă viteza de scăpare de pe un corp de masa M și cu raza r , este egală cu viteza luminii:

$$c = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Viteza de scăpare de atracția gravitațională

Dacă știm masa M a corpului, putem afla raza:

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

Viteza de scăpare de atracția gravitațională

Introducerea în ecuație a masei M egală cu masa Pământului: $5,972 \times 10^{24}$ kg produce o rază de 8,87 milimetri.

Viteza de scăpare a Soarelui este de 617,7 kilometri pe secundă, dată fiind masa solară și raza medie a Soarelui.

Pentru ca viteza de scăpare a Soarelui să crească la viteza luminii sau la 300.000 de kilometri pe secundă, raza ar trebui să fie redusă de la 695.700 de kilometri până la o rază mai mică de 2.953 km (aproximativ 3 km).

Cum ar arăta Soarele dacă ar fi comprimat la 2.953 kilometri?

Cu viteza de scăpare egală cu viteza luminii, lumina nu mai va scăpa de atracția gravitațională, așa că soarele ar apărea întunecat.

Viteza de scăpare de atracția gravitațională

Folosind doar fizica clasică, John Michell a fost primul care a descris stelele întunecate, încercând să determine o metodă de măsurare a distanței și luminozității stelelor.

În schimb, el a inventat prima descriere a unei găuri negre, un obiect masiv suficient pentru a împiedica ca lumina să scape de atracția gravitațională.

Stea Întunecată – Dark Star



John Michell, 1724 - 1793

În 1783 clericul și filozoful englez John Michell a propus pentru prima oară existența unui obiect ceresc suficient de masiv încât lumina nu poate scăpa. Un astfel de obiect, pe care el l-a numit “stea întunecată” (dark star), nu ar fi vizibil în mod direct, dar ar putea fi identificat prin mișcările unei stele însoțitoare, dacă ar face parte dintr-un sistem binar.

Legea atracției universale a lui Newton (1687) precum și conceptul de “viteză de scăpare” erau cunoscute la acea vreme dar nu și teoria relativității.



Pierre-Simon Laplace, 1749 - 1827

În 1796 matematicianul francez Pierre-Simon Laplace descrie același concept în cartea *Exposition du Systeme du Monde*: "Atracția gravitațională a unei stele cu un diametru de 250 de ori mai mare decât cea a Soarelui și o densitate comparabilă cu pământul ar fi atât de mare încât nici o lumină nu ar putea scăpa de pe suprafața sa. Cele mai mari corpuri din univers pot fi astfel invizibile din cauza magnitudinii lor."