

გამოსხივების თეორია - შესავალი - 2

ელექტრო-მაგნიტური გამოსხივება: ქვანტური დუალიზმი	2
ელექტრო-მაგნიტური ტალღები.....	3
ელექტრო-მაგნიტური ტალღის პოლარიზაცია	4
პოლარიზაცია არეკვლით	7
პოლარიზებული გამოსხივების წყაროები	8
არა-სითბური გამოსხივება დამუხრუჭებით (Bremsstrahlung).....	10
ციკლოტრონული/სინქროტრონული გამოსხივება	12
ტომსონის და კომპტონის გაფანტვა	13
შებრუნებული კომპტონის გაფანტვა.....	13
სიუნიაევ-ზელდოვიჩის ეფექტი	15
ვაკილოვ-ჩერენკოვის გამოსხივება.....	16
რელეის გაფანტვა	16
რამანის გაფანტვა	18
ლაზერი	19
ასტროფიზიკური მაზერი	20
ეგზოტიკური არასითბური წყაროები	21

ელექტრო-მაგნიტური გამოსხივება: ქვანტური დუალიზმი

ქვანტური დუალიზმი: ტალღა/ნაწილაკი

$$E = h \nu$$

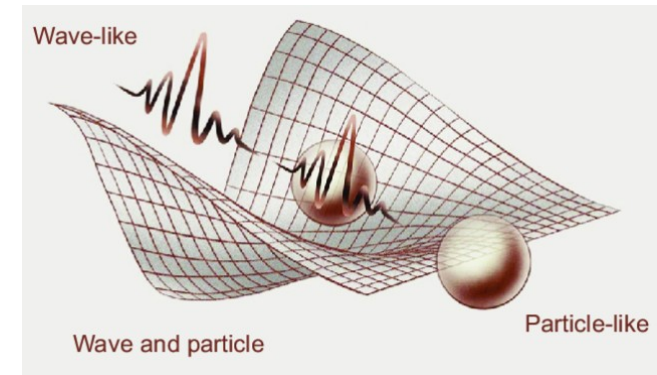
$$E = h c / \lambda$$

ტალღა: ტალღის სიგრძე

ნაწილაკი: ენერგია

ტალღა -> ნაწილაკი (ე.მ. ტალღა/ფოტონი)

ნაწილაკი -> ტალღა (დე ბროილის ტალღის სიგრძე)



- ტალღური თვისებები (დიდი ტალღის სიგრძეები, რადიო/ინფრა.წ.)

ინტერფერენცია, დიფრაქცია, სივრცეში ენერგიის უწყვეტი გადატანა;

- ნაწილაკის თვისებები (მოკლე ტალღის სიგრძეები, ულტრა იისფ. რენტგენი, გამა)

გაფანტვა (კომპტონი), დაჯახება (ფოტოეფექტი), ენერგიის დისკრეტული გადატანა (მაგ. CCD დეტექტორი);

მაგ:

პროტონის დე ბროილის ტალღის სიგრძე: $m_p \approx 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $v = 1 \times 10^6 \text{ m/s}$ $\lambda \approx 4.0 \times 10^{-13} \text{ m}$

ელექტრონის დე ბროილის ტალღის სიგრძე: $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $\lambda \approx 7.3 \times 10^{-10} \text{ m}$

ხილული დიაპაზონი: ტალღური + კორპუსკულარული თვისებები;

- ელექტრომაგ. გამოსხივების უნივერსალური თვისება: პოლარიზაცია

ელექტრო-მაგნიტური ტალღები

მაქსველის განტოლებები ვაკუუმში (მუხტი, დენი=0)

- ელ. ველის გაუსის კანონი: $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$
- მაგ. ველის გაუსის კანონი: $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
- ფარადეის კანონი: $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
- ამპერ-გაუსის კანონი: $\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

დროში ცვლადი მაგნიტური ველი -> ელექტრული ველი
დროში ცვლადი ელექტრ. ველი -> მაგნიტური ველი

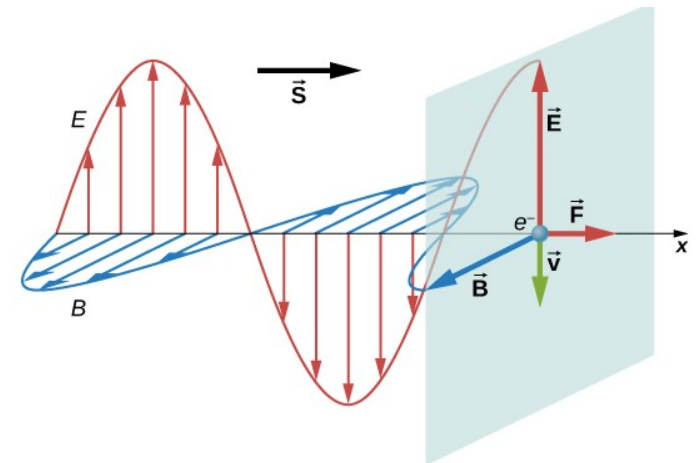
ტალღური ფორმა:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0$$

„ვაკუუმური ტალღა“

სრულყოფილი აღწერისთვის საკმარისია
ავირჩიოთ ერთ-ერთი კომპონენტი: $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$



ელექტრო-მაგნიტური ტალღის პოლარიზაცია

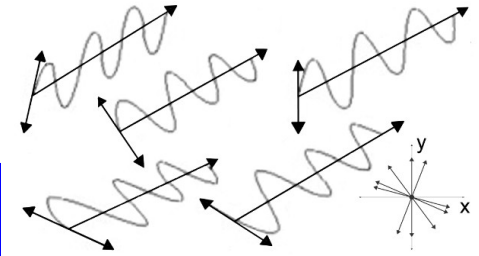
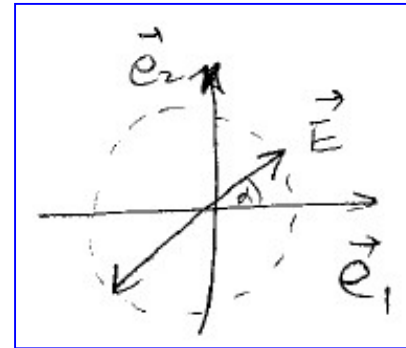
თავისუფლების ხარისხი:

ელექტრული ველის ვექტორის რხევის მიმართულება

$$\vec{E} = \vec{e}_1 E_1 + \vec{e}_2 E_2$$

$$\vec{E} = (\vec{e}_1 E_1 + \vec{e}_2 E_2) \exp(i\vec{k}\vec{r} - i\omega t)$$

$$\vec{e}_{\pm} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (\vec{e}_1 \pm i\vec{e}_2)$$



ყველა შესაძლო პოლარიზაცია შესაძლებელია აღიწეროს შემდეგი პარამეტრებით:

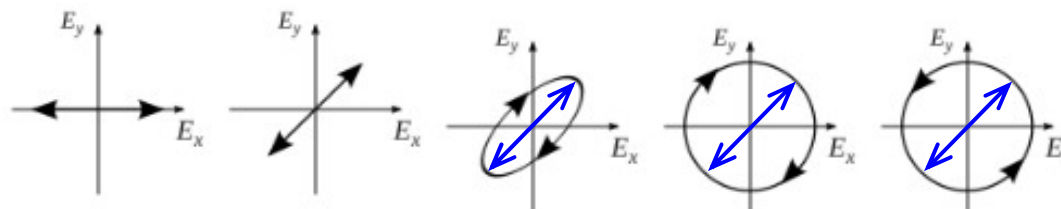
$$|\vec{e}_1 \vec{E}|^2, |\vec{e}_2 \vec{E}|^2, |\vec{e}_+ \vec{E}|^2, |\vec{e}_- \vec{E}|^2$$

$$\begin{cases} S_0 \equiv |\vec{e}_1 \vec{E}|^2 + |\vec{e}_2 \vec{E}|^2 \\ S_1 \equiv |\vec{e}_1 \vec{E}|^2 - |\vec{e}_2 \vec{E}|^2 \\ S_2 \equiv 2 \operatorname{Re} [(\vec{e}_1 \vec{E})^* (\vec{e}_2 \vec{E})] \\ S_3 \equiv 2 \operatorname{Im} [(\vec{e}_1 \vec{E})^* (\vec{e}_2 \vec{E})] \end{cases}$$

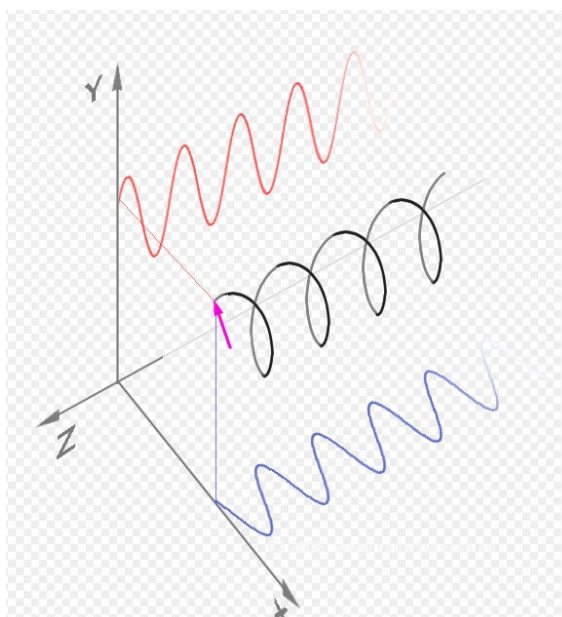
$\vec{e}$ – რხევის მიმართულების ვექტორი
 E – რხევის ამპლიტუდა

ელექტრო-მაგნიტური ტალღის პოლარიზაცია

წრფივი, წრიული და ელიფსური პოლარიზაციები:



ორი თანაბარი ამპლიტუდის წრფივად პოლარიზებული ტალღის ჯამი, როდესაც პოლარიზაციის სიბრტყეები პერპენდიკულარულია: წრიული პოლარიზაცია



ელექტრო-მაგნიტური ტალღის პოლარიზაცია

სტოქსის პარამეტრები:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}$$

- $I = I_{0^\circ} + I_{90^\circ}$ (total intensity)
- $Q = I_{0^\circ} - I_{90^\circ}$ (H vs V)
- $U = I_{45^\circ} - I_{135^\circ}$ ($\pm 45^\circ$ linear)
- $V = I_{\text{RCP}} - I_{\text{LCP}}$ (right- vs left-circular)

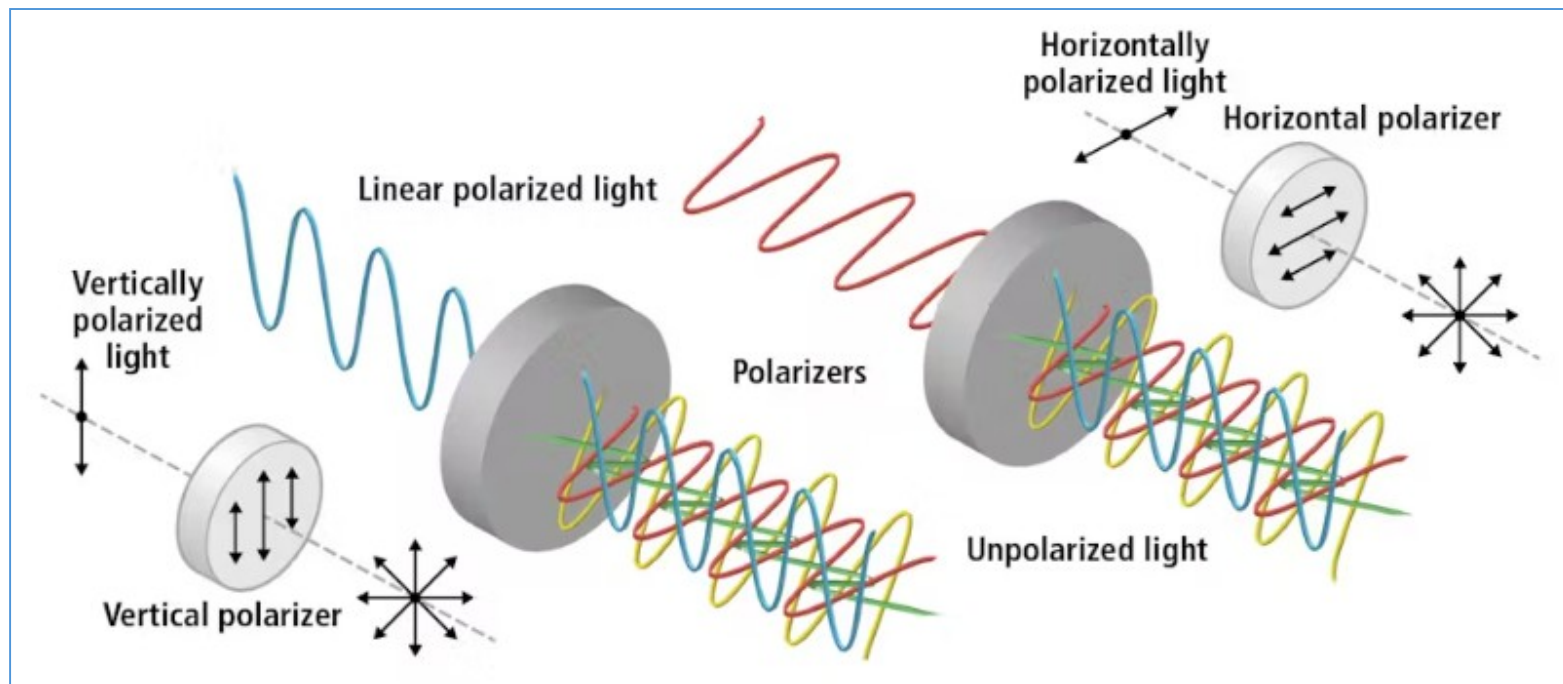
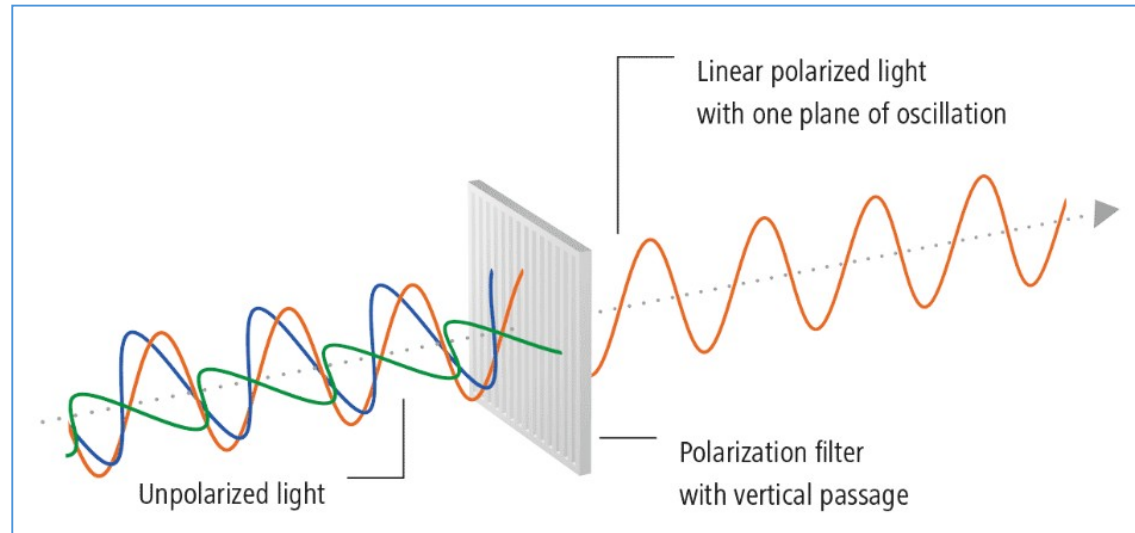
პოლარიზაციის ხარისხი:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (0 \leq P \leq 1)$$

დაკვირვების მეთოდი:

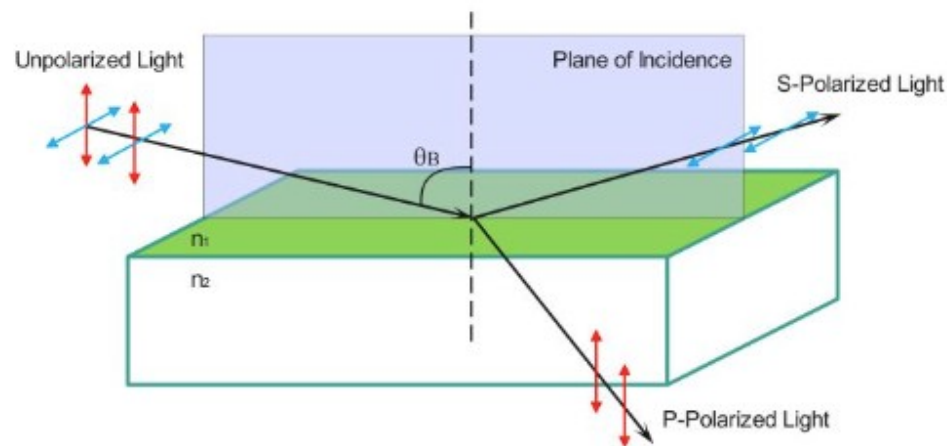
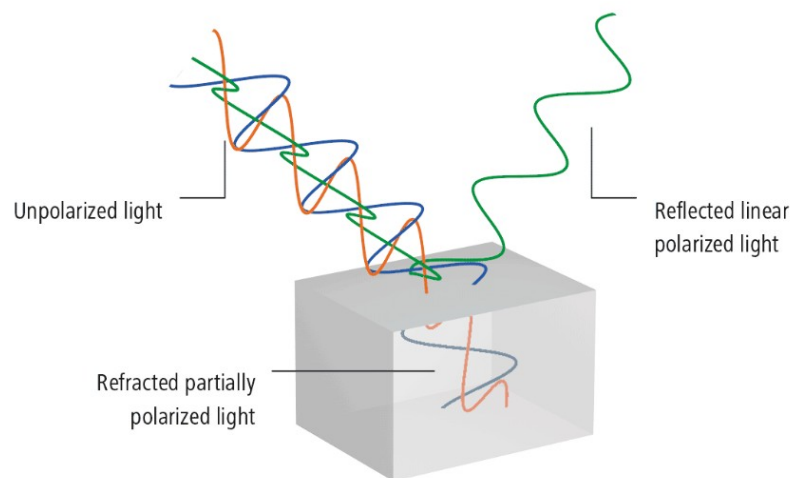
- გავზომოთ წრფივი პოლარიზაცია წრფივი იდეალური პოლარიზატორით: $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$ [I, Q, U]
- გავზომოთ პოლარიზაცია $\frac{1}{4}$ ტალღის სიგრძით დაშრებულ წერტილში: [V]

ელექტრო-მაგნიტური ტალღის პოლარიზაცია



პოლარიზაცია არეკვლით

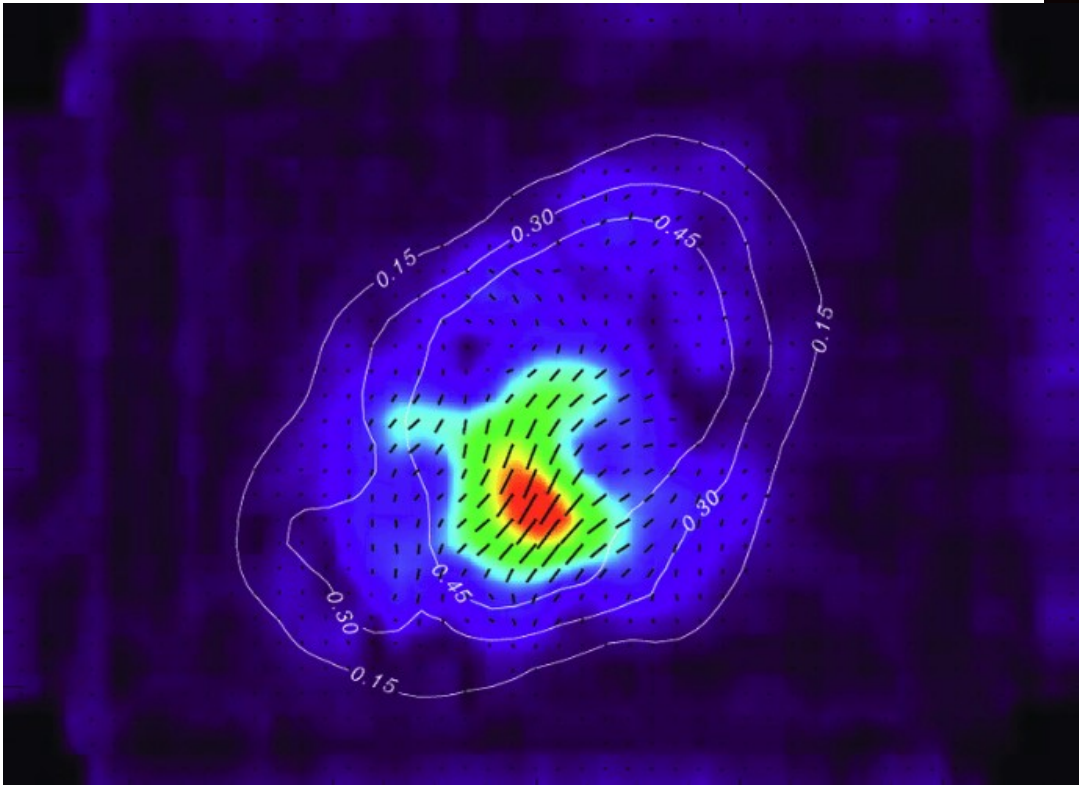
ელექტრომაგნიტური ტალღის არეკვლა/გარდატეხვა ზედაპირთან



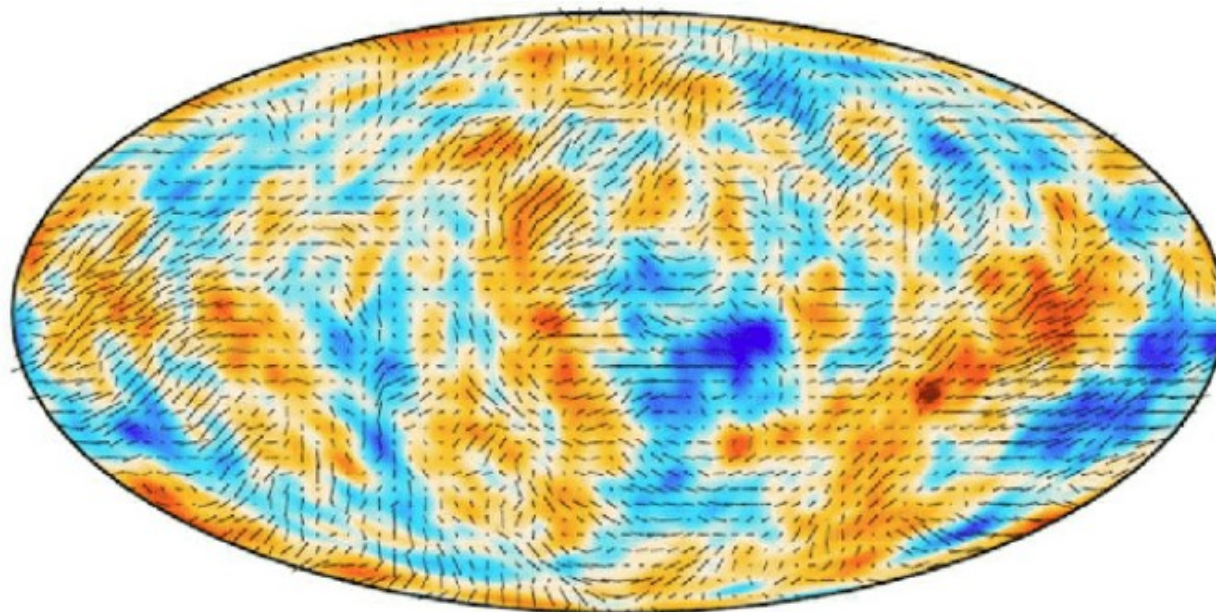
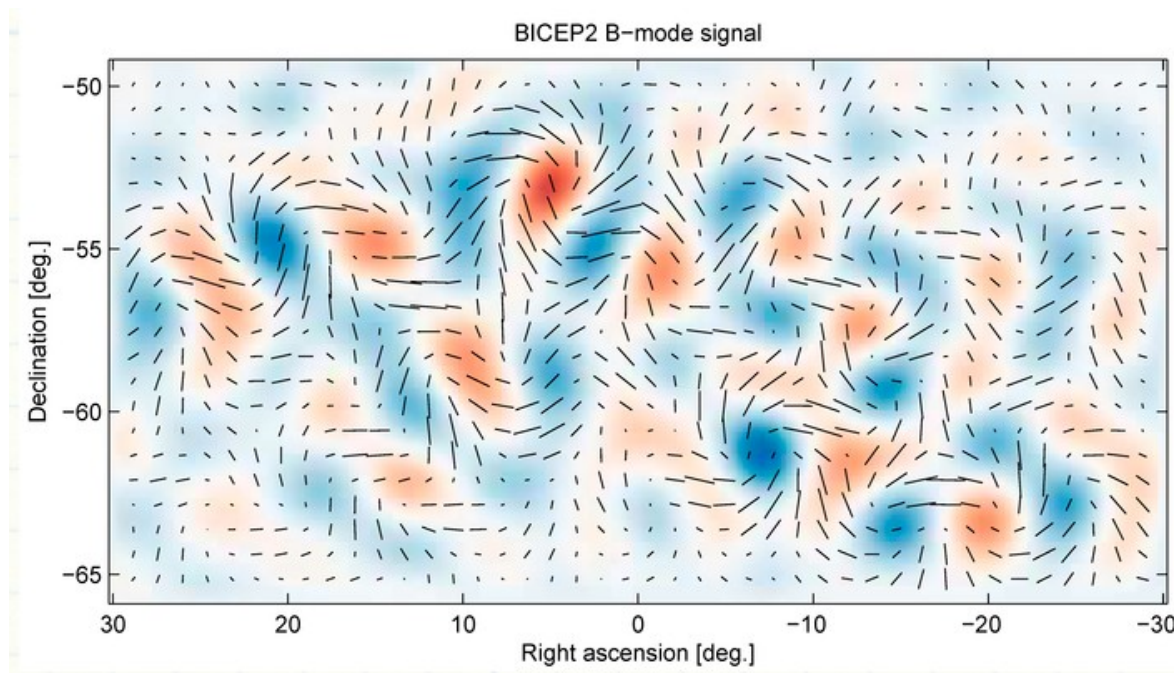
პოლარიზებული გამოსხივების წყაროები

კობირჩხალას ნისლეული

პოლარიზაციის ინტენსივობა: P

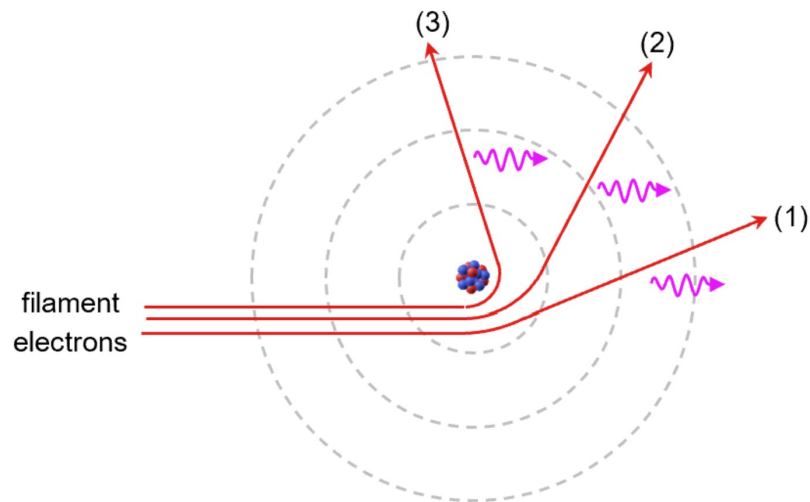


რელიქტური ფონის გამოსხივების პოლარიზაცია



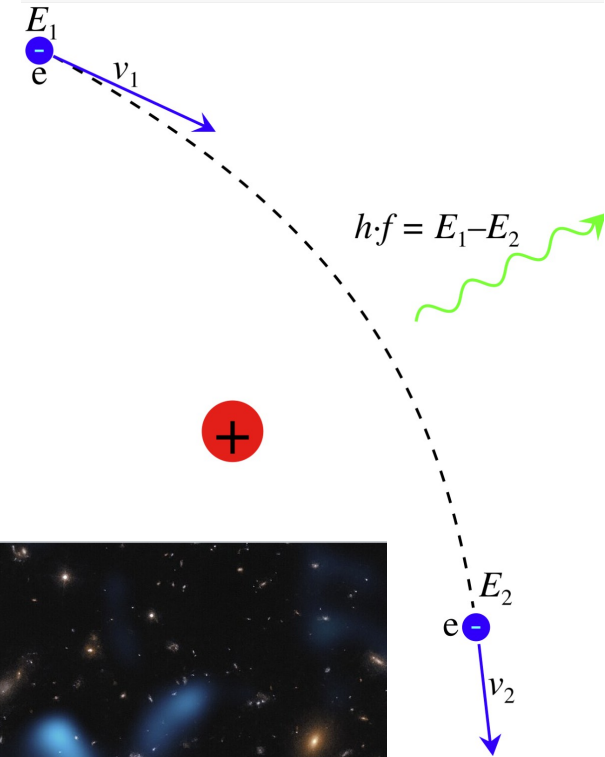
არა-სითბური გამოსხივება დამუხრუჭებით (Bremsstrahlung)

დამუხრუჭი ნაწილაკი ურთიერთქმედებისას (დამუხრუჭებისას) **ასხივებს** დაკარგულ ენერგიას ფოტონების სახით



- (1) distant interaction produces low energy x-ray photon.
- (2) close interaction produces moderate energy x-ray photon.
- (3) maximum energy of x-ray photon is equal to energy of field electron.

ელექტრონების განაწილების სტატისტიკა:
ზეახალის ნარჩენების და გარემოს ზემოქმედება



The overlaid blue cloud illustrates the intracluster medium around the [Spiderweb Galaxy](#), as seen when the universe was 3 billion years old

ციკლოტრონული/სინქროტრონული გამოსხივება

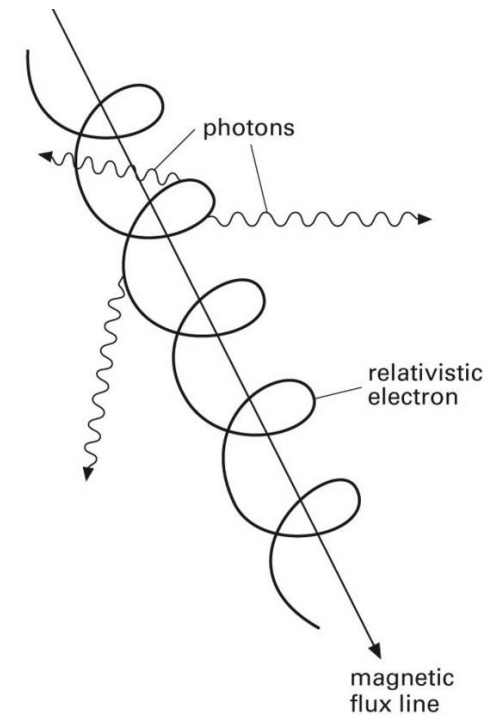
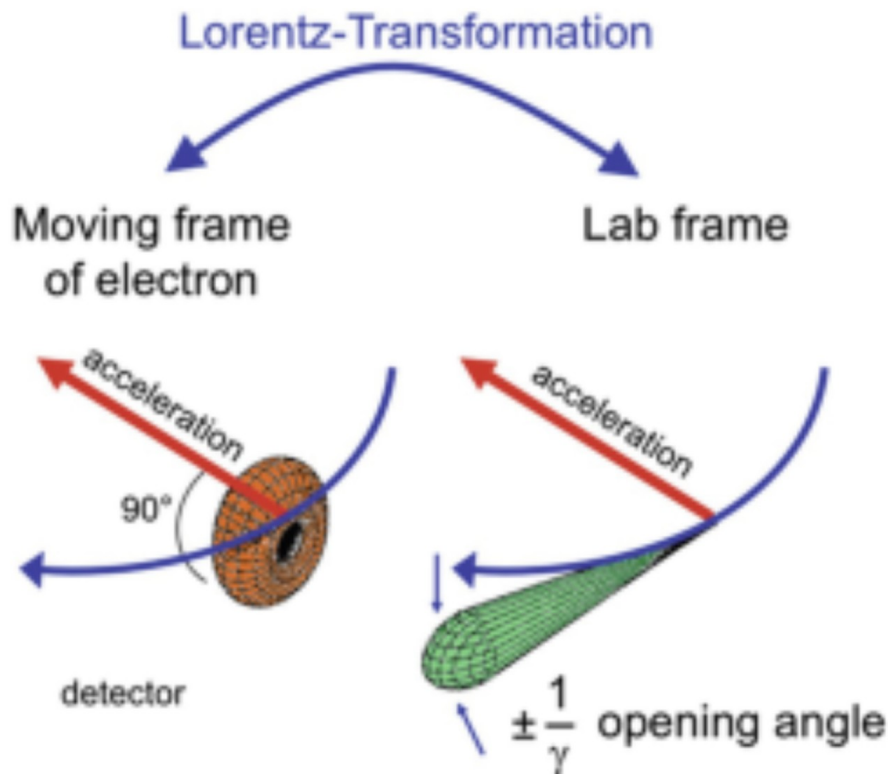
დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედებს სიჩქარის პერპენდიკულარული ლორენცის ძალა.
ნაწილაკი განიცდის გირაციას: ბრუნავს წარმოსახვითი მაგნიტური ველის ძალწირის გარეშე.

ბრუნვა -> აჩქარებული მოძრაობა -> გამოსხივება

ელექტრონის გირაციის სიჩქარე:

კლასიკური: ციკლოტრონული გამოსხივება;

რელატივისტური: სინქროტრონული გამოსხივება;

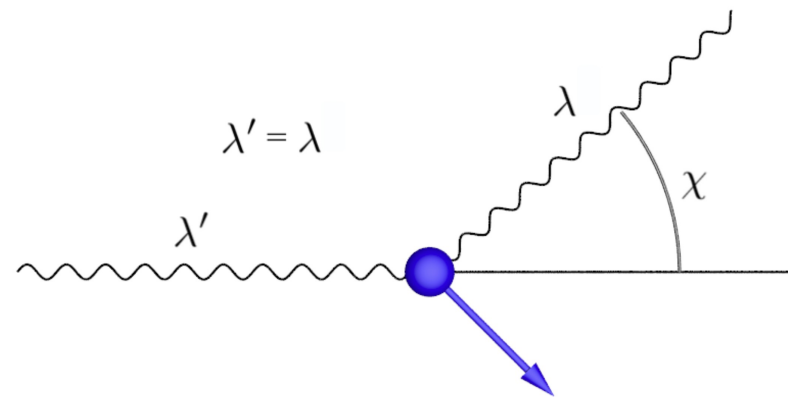


ციკლ.: Solar flares, magnet. of planets and stars

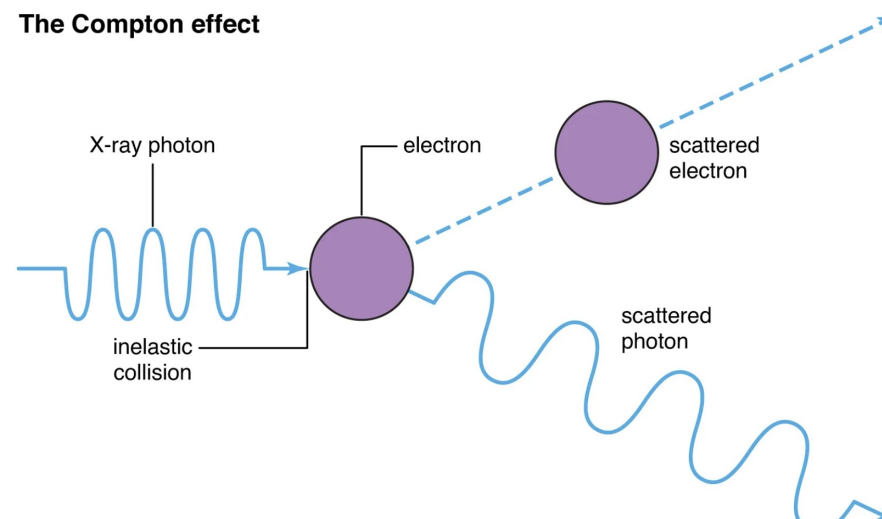
სინქრ.: Crab Nebula, radio galaxies, AGN jets

ტომსონის და კომპტონის გაფანტვა

ტომსონი: ფოტონის ელექტრონზე **დრეკადი** გაფანტვა;

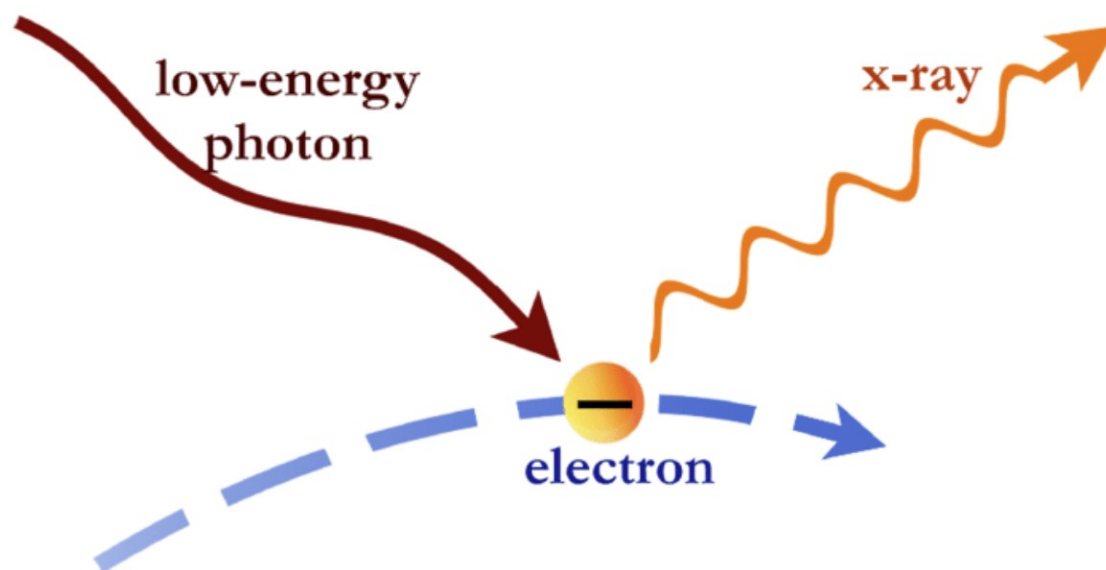


კომპტონი: ფოტონის ელექტრონზე **არა-დრეკადი** გაფანტვა; (კომპტონიზაცია)



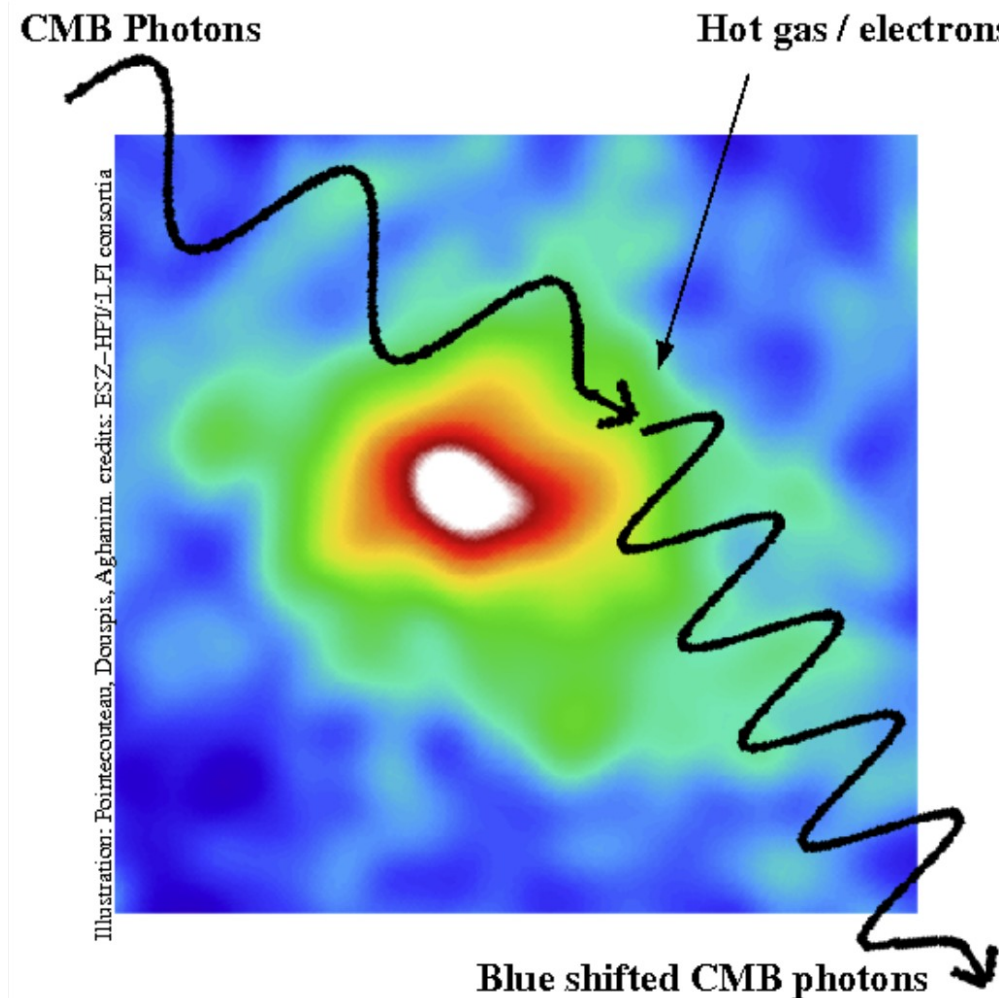
შებრუნებული კომპტონის გაფანტვა

ფოტონის და (რელატივისტური?) ელექტრონის არადრეკადი დაჯახება, როდესაც ენერგიას იძენს ფოტონი.



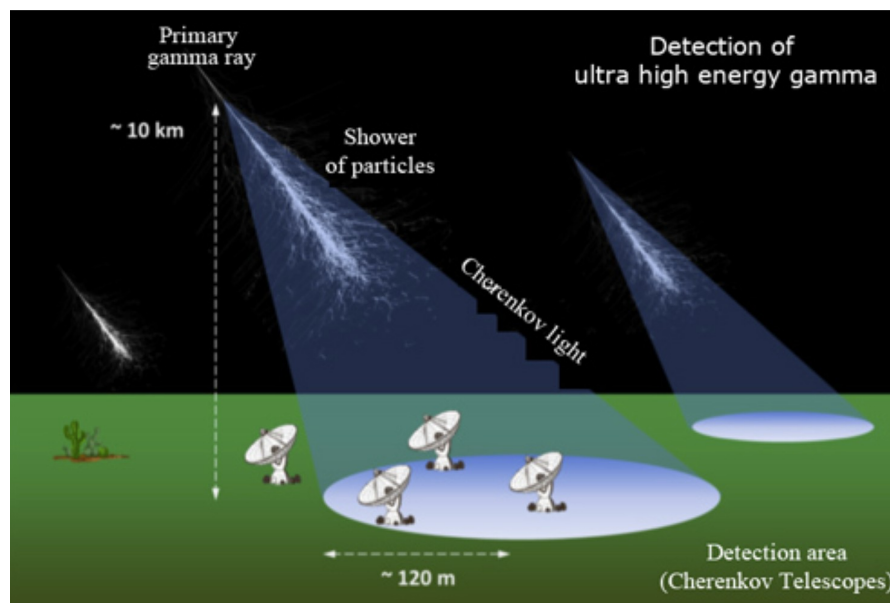
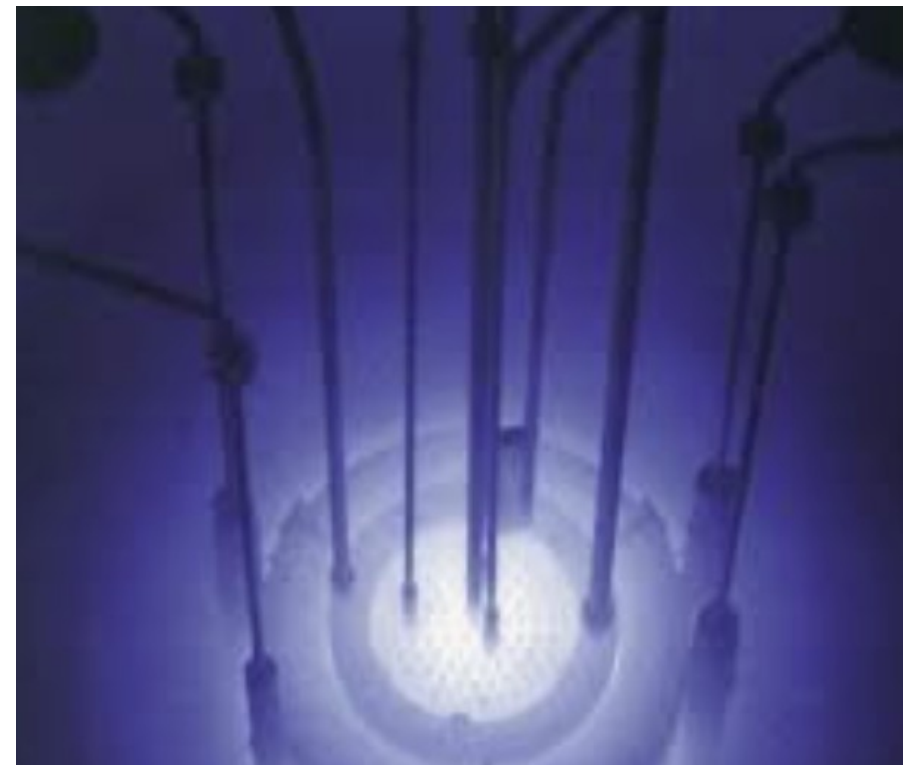
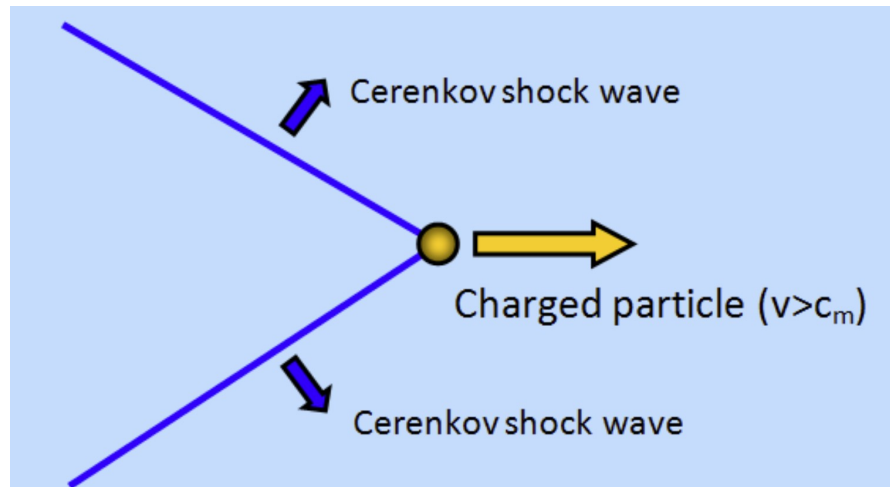
სიუნიაევ-ზელდოვიჩის ეფექტი

რელიქტური ფონის ფოტონების (გამოსხივების) სიხშირის მატება (გალურჯება) გალაქტიკათა კლასტერების რელატივისტურ ელექტრონებზე გაფანტვით (inverse Compton)



ვაკილოვ-ჩერენკოვის გამოსხივება

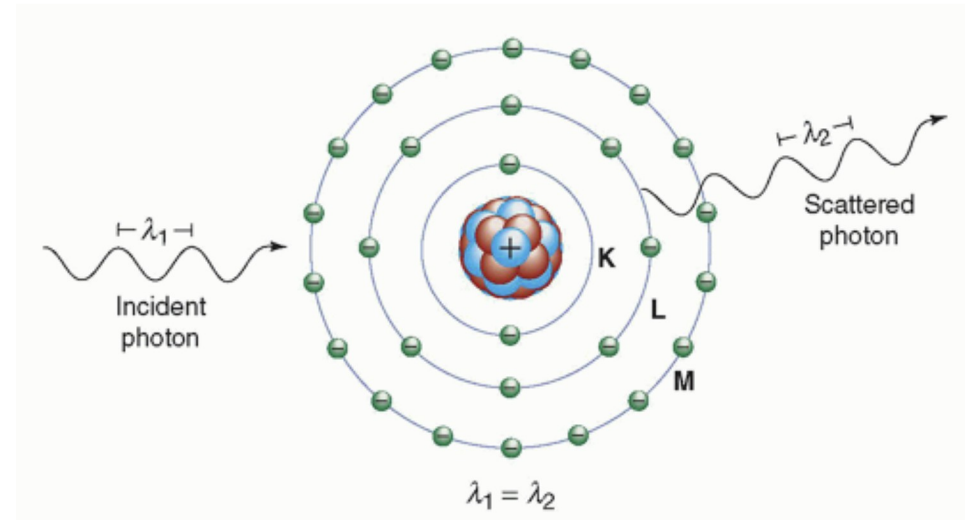
დამუხტული ნაწილაკი განიცდის დამუხრუჭებას (უარყოფით აჩქარებას), როდესაც იგი მოძრაობს გარემოში ლოკალურ სინათლის სიჩქარეზე უფრო სწრაფად.



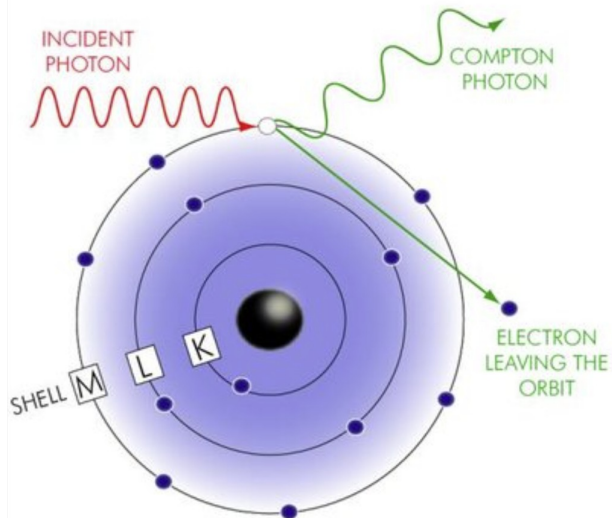
რელის გაფანტვა

ფოტონის ატომზე **დრეკადი** გაფანტვა.

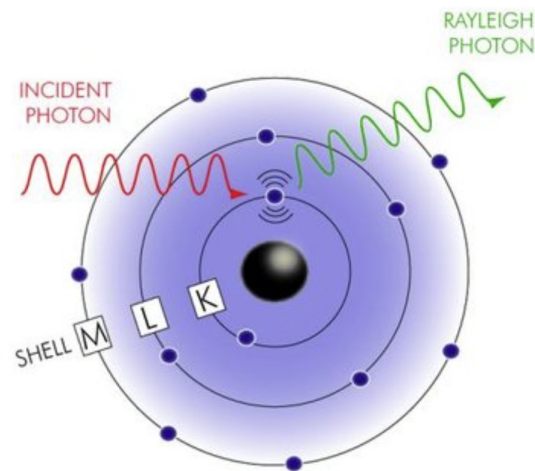
კომპტონი: გაფანტვა ელექტრონზე;
რელი: გაფანტვა ატომზე



COMPTON SCATTERING



RAYLEIGH SCATTERING



რატომ არის ცა ღურჯი?

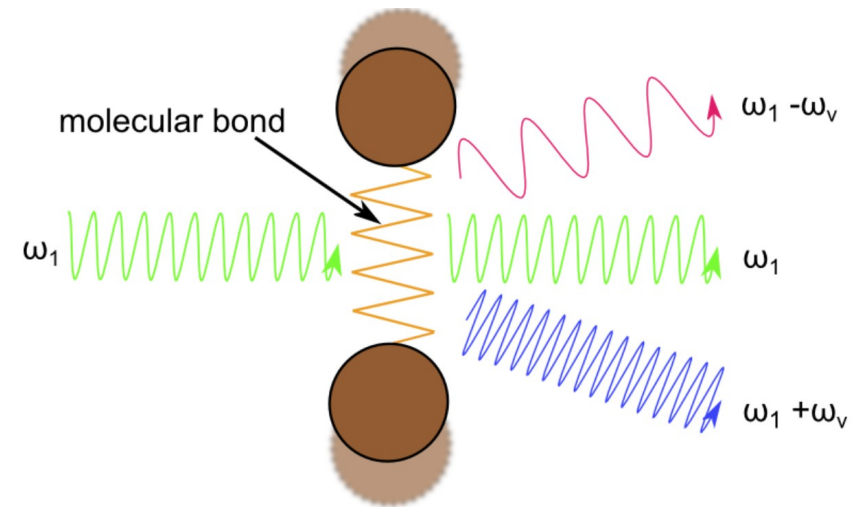
რამანის გაფანტვა

ფოტონის და მოლეკულაზე
არადრეკადი გაფანტვა

მოლეკულის შიდა რხევითი ან ბრუნვითი
ენერგიის:

აღგზნება - ფოტონის გაწითლება;

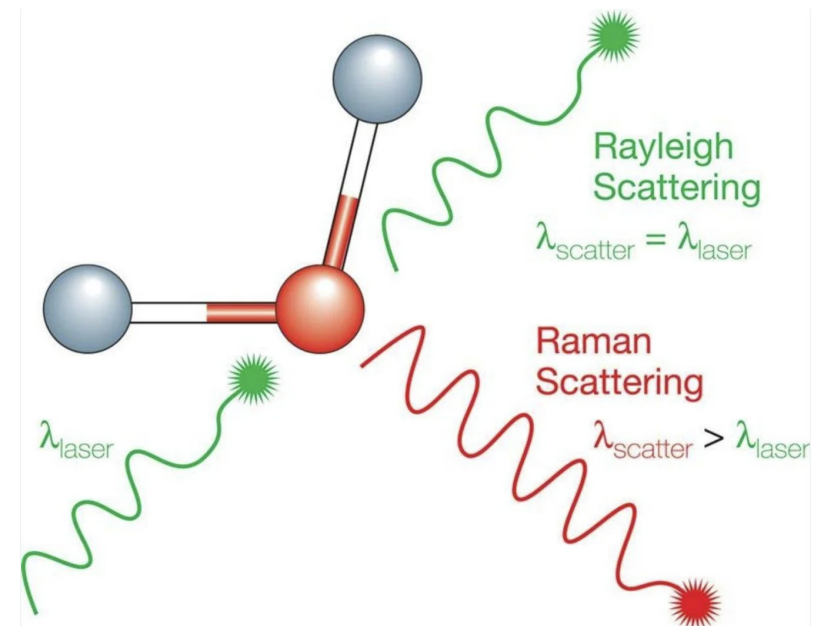
ჩახშობა - ფოტონის გალურჯება;



მოლეკულაზე სინათლის გაფანტვა:

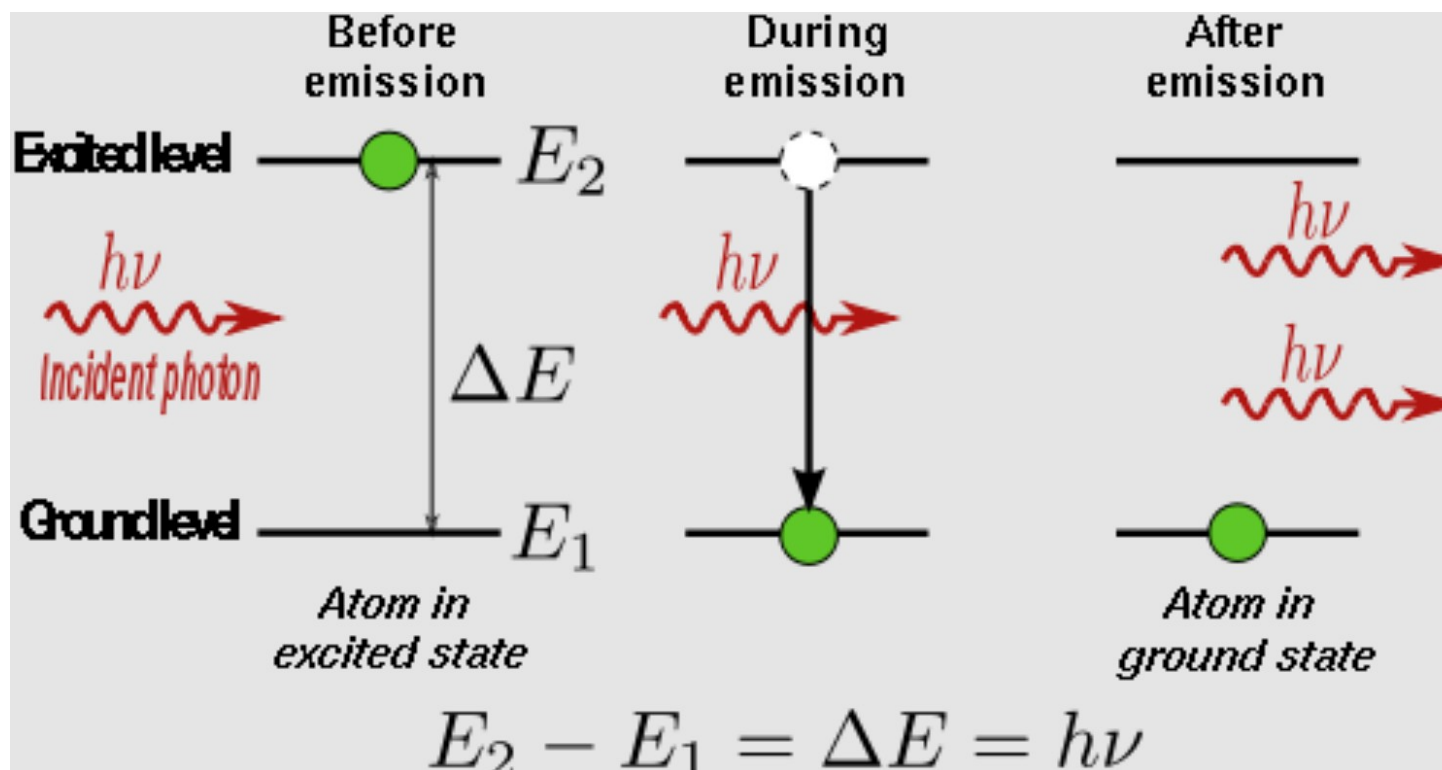
დრეკადი: რეელის გაფანტვა

არადრეკადი: რამანის გაფანტვა;



ლაზერი

LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



გარე ფოტონის მიერ აღზნებულ მდგომარეობაში მყოფი ატომის სტიმულირება ელექტრონულად გადაჯერებული (ჩატუმბული) ატომები/გარემო

ასტროფიზიკური მაზერი

MASER - microwave amplification by stimulated emission of radiation

მიკროტალღოვანი ლაზერი;

ბუნებრივად ოპტიკურად აღგზნებულ მდგომარეობაში მყოფი მოლეკულები:

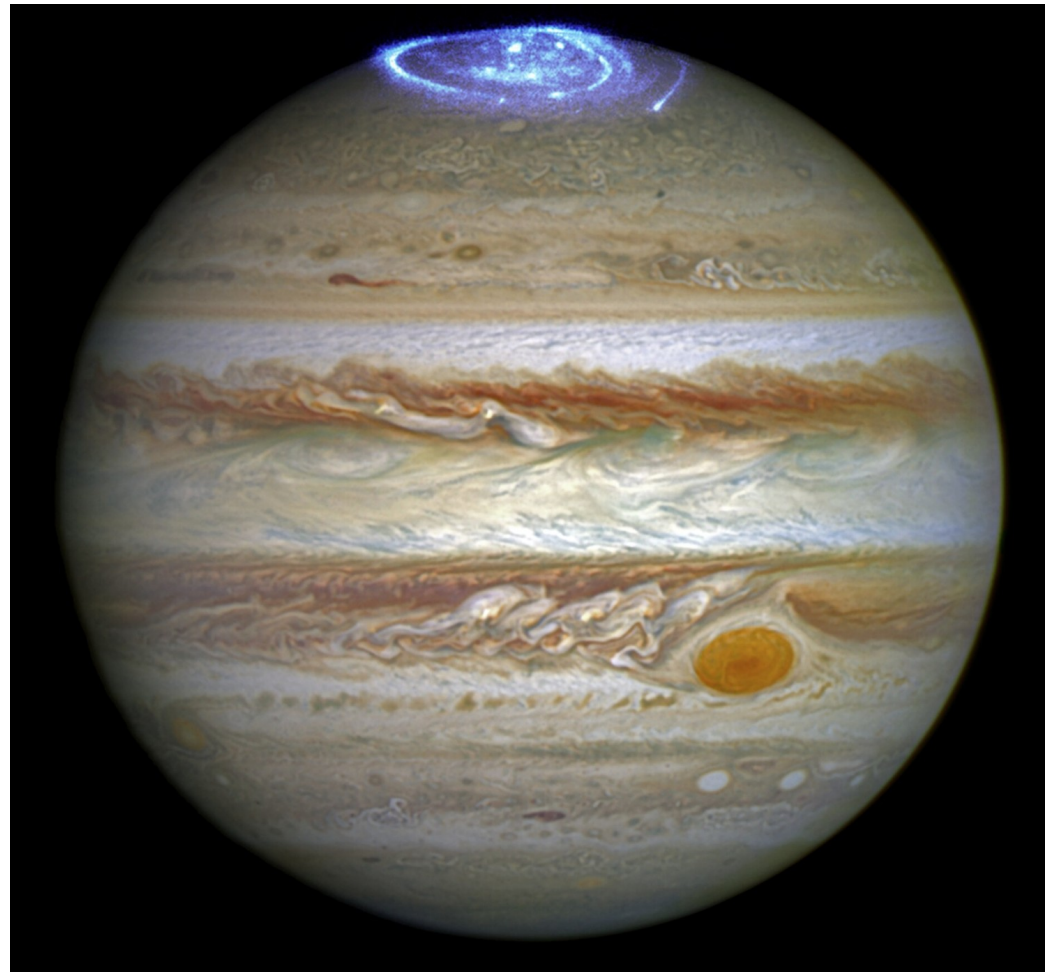
- H_2O , NH_3 , CH_3OH , SiO ...

გამოსხივების სიხშირე:

დაბალსიხ. ინფრაწითელი დიაპაზონი;

მაგალითი:

იუპიტერის
პოლარული
ნათება



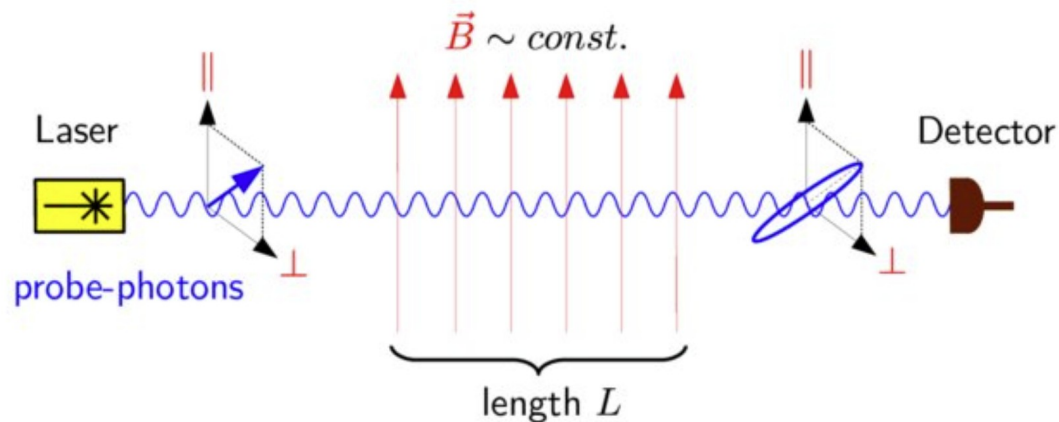
ეგზოტიკური არასითბური წყაროები

წყვილების წარმოშობა/ანიჰილაცია

- Two-photon annihilation ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$).
- Photon-photon pair production ($\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$).
- Photon-matter pair production ($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$).

ვაკუუმის პოლარიზაცია (ანომალურად ძლიერი ელექტრული/მაგნიტური ველები)

- **Vacuum birefringence / photon splitting** in ultra-strong magnetic fields (magnetars).



ფოტონის პოლარიზაცია იცვლება ვაკუუმში არსებული მაგნიტური ველის გამო

- გამოსხივების გადატანის თეორია
- გამოსხივების ზემოქმედება გარემოზე (რადიაციული ჰიდროდინამიკა)
- ...

