

გამოსხივების წყაროები - არასითბური გამოსხივება

- კვანტური დუალიზმი: ნაწილაკი-ტალღა
- კოჰერენტობის მატრიცა და სტოქსის პარამეტრები
- ელ.მაგ. ტალღის პოლარიზაცია
- არასითბური გამოსხივების მექანიზმები
- კოჰერენტული გამოსხივება
- ეგზოტიკური არასითბური წყაროები
- გამოსხივების ზღვრები (“კატასტროფები”)

ქვანტური დუალიზმი: ტალღა-ნაწილაკი

ქვანტური დუალიზმი: ტალღა/ნაწილაკი

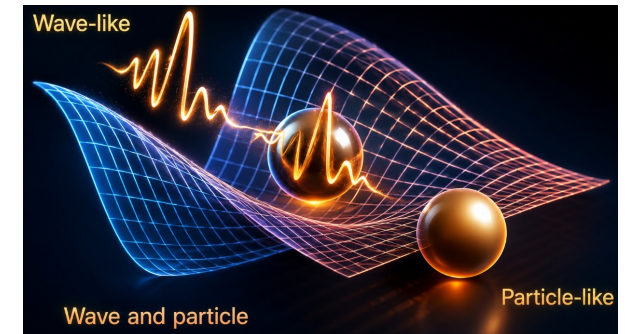
$$E = h c / \lambda \quad E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = h \nu$$

„ტალღის“ კორპუსკ. აღწერა:

სიხშირე

„ნაწილაკის“ ტალღური აღწერა:

დე ბროილის ტალღის სიგრძე



- ელ. მაგ. გამოსხივების ტალღური თვისებები (დიდი ტალღის სიგრძეები):
ინტერფერენცია, დიფრაქცია, სივრცეში **ენერგიის უწყვეტი გადატანა**;
 - ნაწილაკის თვისებები (მოკლე ტალღის სიგრძეები, ულტრა იისფ. რენტგენი, გამა)
გაფანტვა (კომპტონი), დაჯახება (ფოტოეფექტი);
- ხილული დიაპაზონი:** ტალღური + კორპუსკულარული თვისებები;

მოძრავი პროტონის და ელექტრონის
დებროილის ტალღის სიგრძეები



$$v = 1 \times 10^6 \text{ m/s}$$

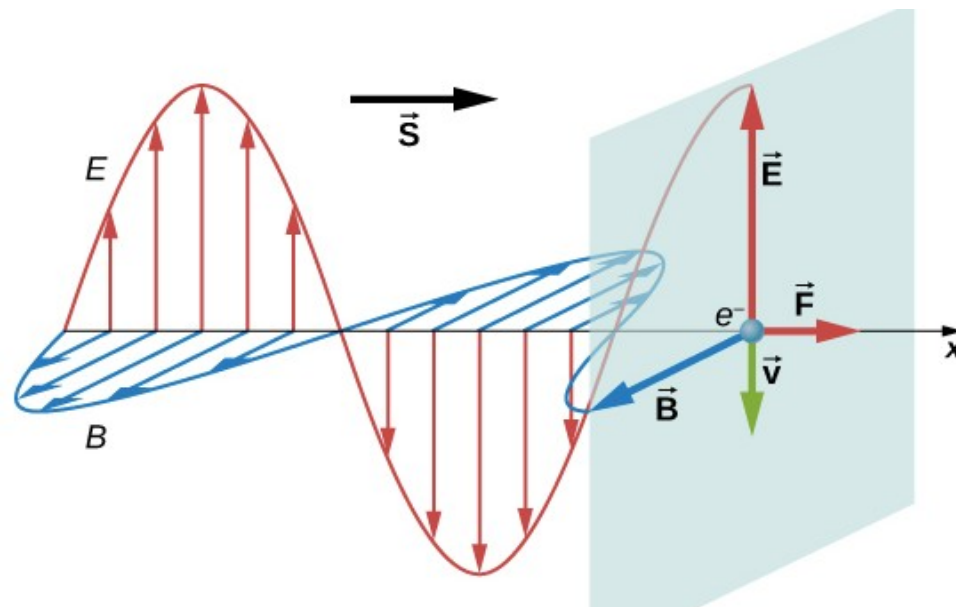
p^+ პროტონი	მასა $m_p \approx 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$	ტალღის სიგრძე $\lambda \approx 4.0 \times 10^{-13} \text{ m}$
e^- ელექტრონი	მასა $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$	ტალღის სიგრძე $\lambda \approx 7.3 \times 10^{-10} \text{ m}$

ელექტრო-მაგნიტური ტალღები

მაქსველის განტოლებები ვაკუუმში (მუხტი, დენი=0)

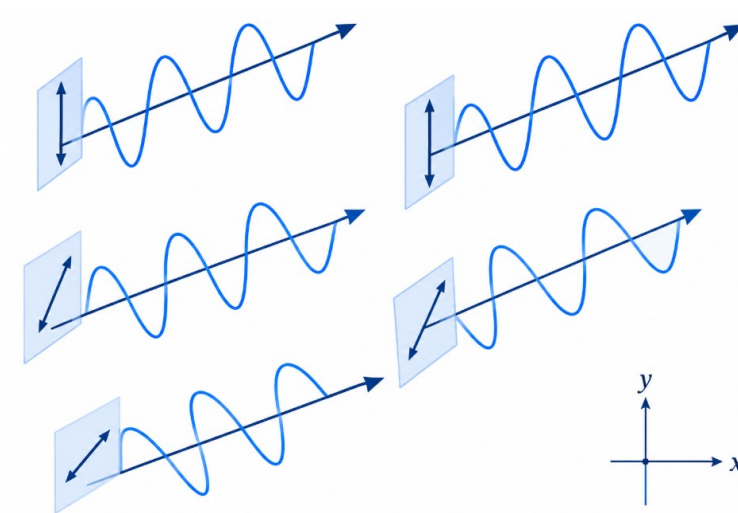
- ელ. ველის გაუსის კანონი: $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$
- მაგ. ველის გაუსის კანონი: $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
- ფარადეის კანონი: $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
- ამპერ-გაუსის კანონი: $\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial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

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



ელექტრო-მაგნიტური ტალღის პოლარიზაცია

თავისუფლების ხარისხი: ელექტრული ველის ვექტორის რხევის მიმართულება



Z - ელ.მაგ. ტალღის გავრცელების მიმართულება
ელ.მაგ. ველის ელექტრული კომპონენტი:

$$\mathbf{E}(t) = \begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{pmatrix}$$

ელ.მაგ. ტალღა ვაკუუმში: ელექტრული ან მაგნიტური ველის კომპონენტი საკმარისია ტალღის თვისებების სრულად აღსაწერად.

კოჰერენტულობის მატრიცა

ტალღის ინტენსივობის და პოლარიზაციის ანალიზური აღწერა:

$$J_{ij} = \langle E_i E_j^* \rangle$$

$\mathbf{J}$ მიმართულებით გავრცელებული ტალღისთვის:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \langle |E_x|^2 \rangle & \langle E_x E_y^* \rangle \\ \langle E_y E_x^* \rangle & \langle |E_y|^2 \rangle \end{pmatrix}$$

მაგალითი:

$$\begin{aligned} E_x &= A_x e^{i\phi_x}, \\ E_y &= A_y e^{i\phi_y}, \end{aligned}$$

A - ტალღის ამპლიტუდა;

ϕ - ტალღის ფაზა;

მატრიცის კომპონენტი (1,2):

$$E_x E_y^* = A_x A_y e^{i(\phi_x - \phi_y)}.$$

სტოქსის პარამეტრები

კოჰერენტობის მატრიციდან აღდგენილი 4 პარამეტრი: **I, Q, U, V**

ტალღის ინტენსივობა:

$$I = J_{xx} + J_{yy}$$

წრფივი პოლარიზაცია:

$$Q = J_{xx} - J_{yy}$$

$$U = 2 \operatorname{Re} J_{xy}$$

$$\begin{aligned} Q : & \quad 0^\circ \text{ vs. } 90^\circ, \\ U : & \quad 45^\circ \text{ vs. } 135^\circ. \end{aligned}$$

წრფივი პოლარიზაცია:

$$V = \pm 2 \operatorname{Im} J_{xy}$$

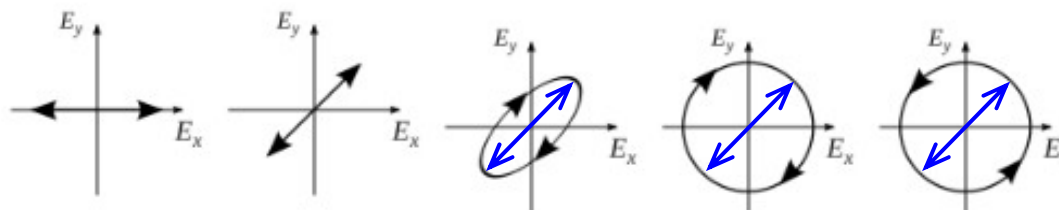
წრიული პოლარიზაცია:

$V > 0$ — ერთი მიმართულების წრიული პოლარიზაცია ზ

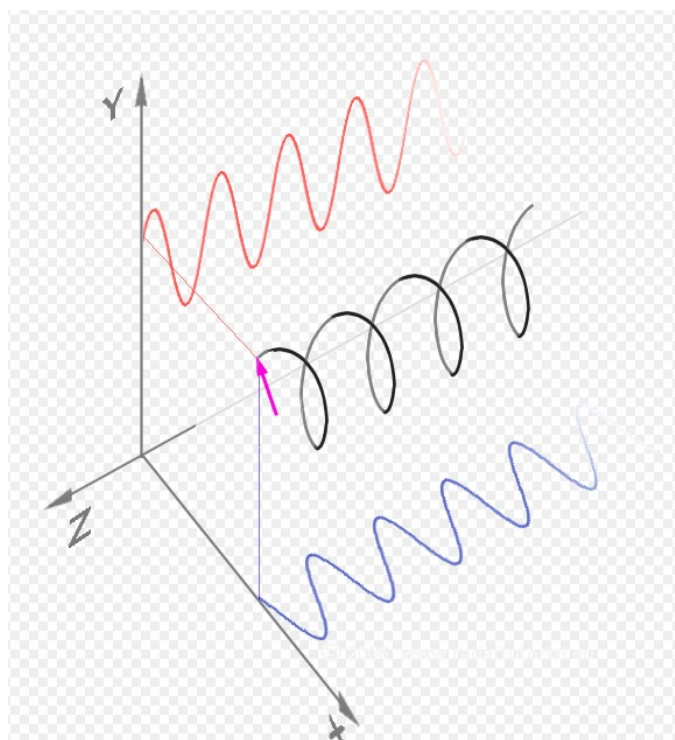
$V < 0$ — საპირისპირო მიმართულების წრიული პოლარიზაცია ო

ელექტრო-მაგნიტური ტალღის პოლარიზაცია

წრფივი, წრიული და ელიფსური პოლარიზაციები:



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



პოლარიზაციის ხარისხი

სრული გამოსხივების რა ნაწილია პოლარიზებული:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}$$

- $P = 0$ — არაპოლარიზებული გამოსხივება
- $P = 1$ — სრულად პოლარიზებული გამოსხივება
- $0 < P < 1$ — ნაწილობრივ პოლარიზებული გამოსხივება

დაკვირვების მეთოდი:

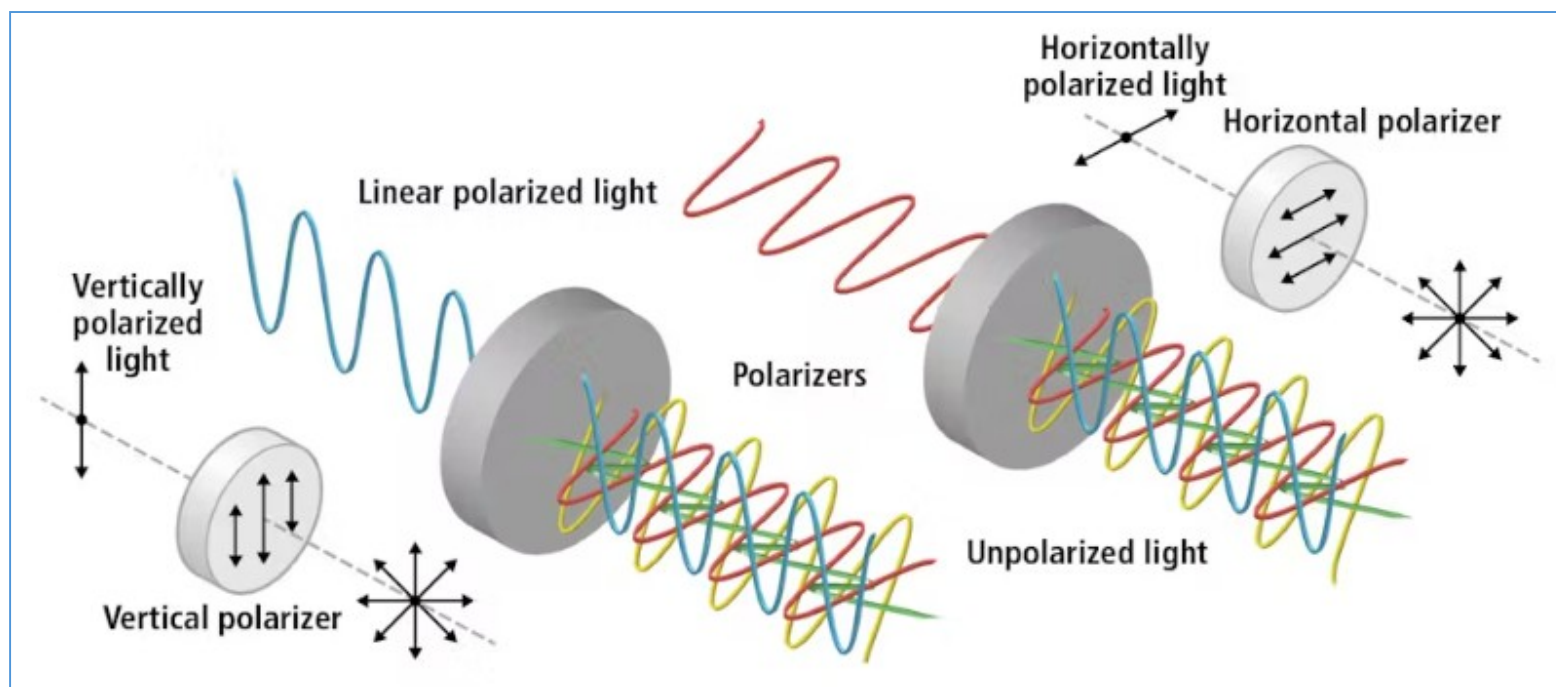
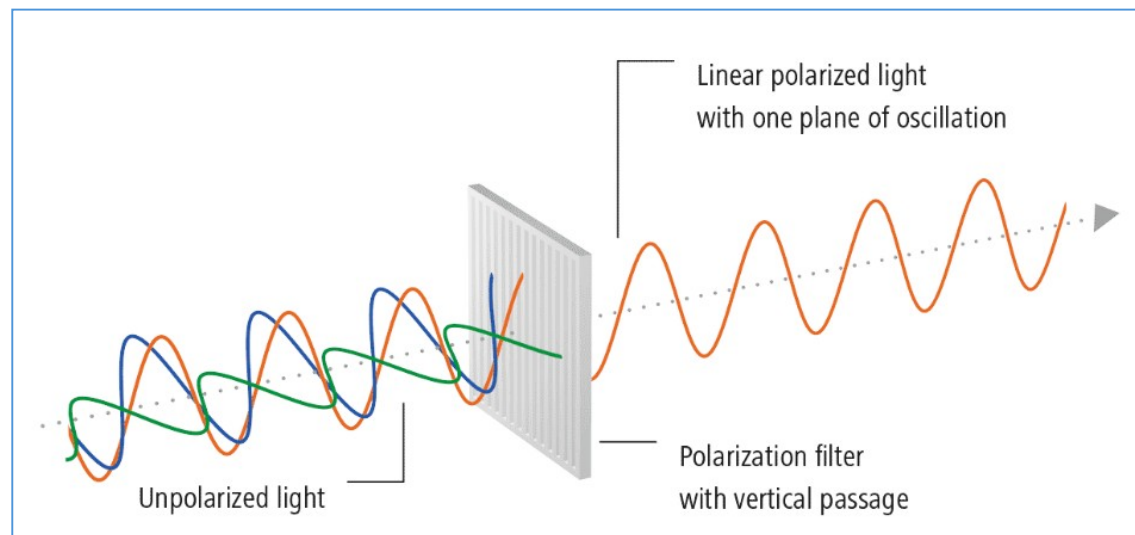
- გავზომოთ წრფივი პოლარიზაცია წრფივი იდეალური პოლარიზატორით:

$$0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ \quad [I, Q, U]$$

- გავზომოთ პოლარიზაცია მარჯვენა და მარცხენა პოლარიზატორში:

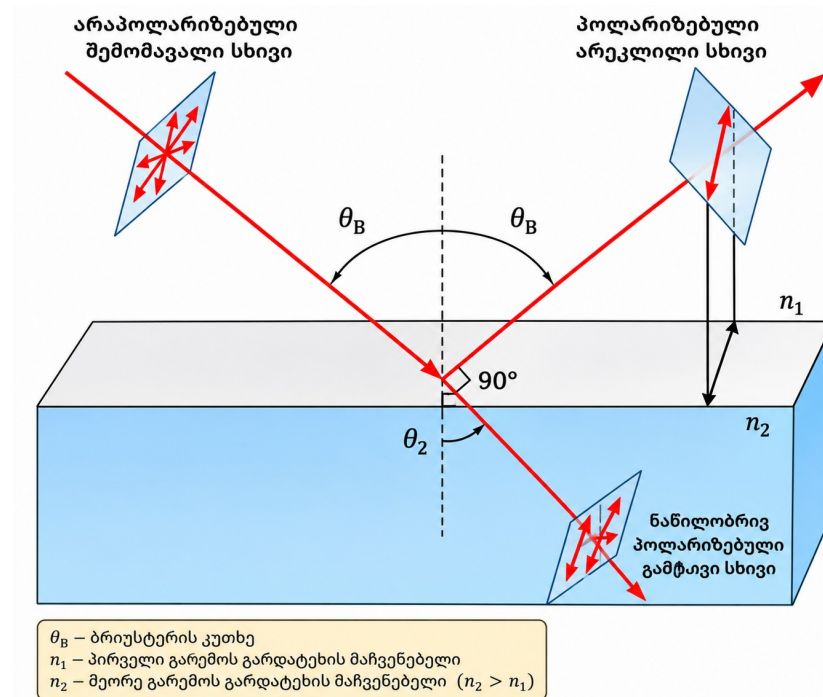
$$V = J_R - J_L$$

არა პოლარიზებული ტალღა



პოლარიზაციის მექანიზმები

პოლარიზაცია არეკვლით: ტალღის არეკვლა/გარდატეხვა ზედაპირთან

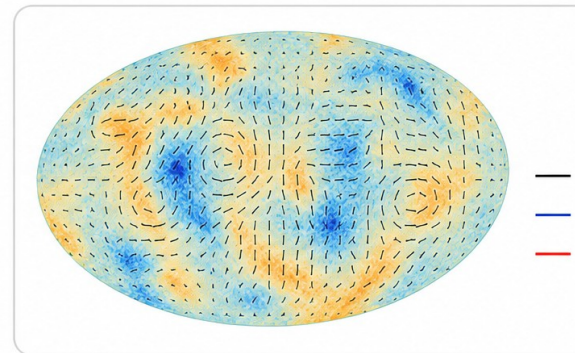
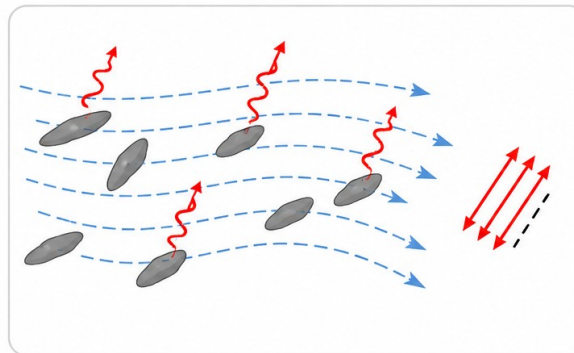
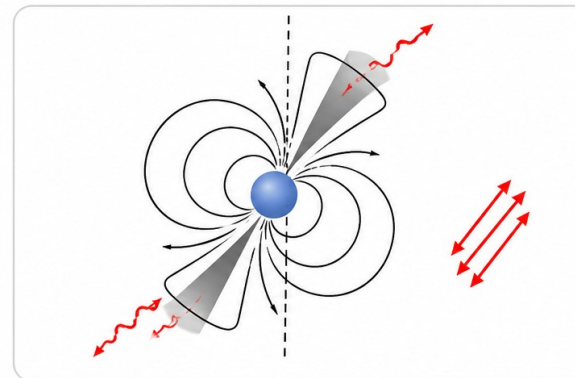
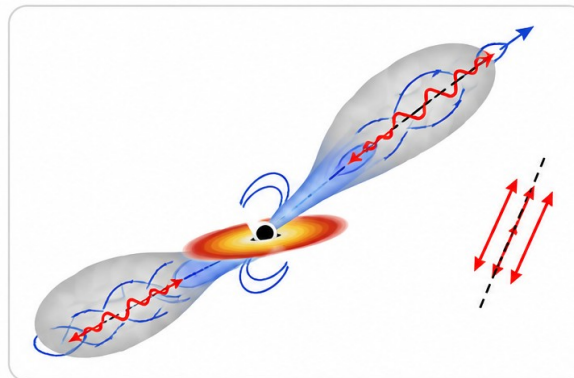


არა-სითბური გამოსხივება

სითბური გამოსხივება: არაპოლარიზებული ელ.მაგ. ტალღა;

პოლარიზებული გამოსხივების წყაროები: არასითბური გამოსხივება

- რელატივისტური ჯეტები, ბლაზარები, კვაზარები,
- პულსარები და მაგნეტარები
- მზის მაგნიტური სტრუქტურები
- ვარსკვლავთშორისი მტვერი
- სწრაფი რადიო ბარსთები (ჩქაფები) (FRB)

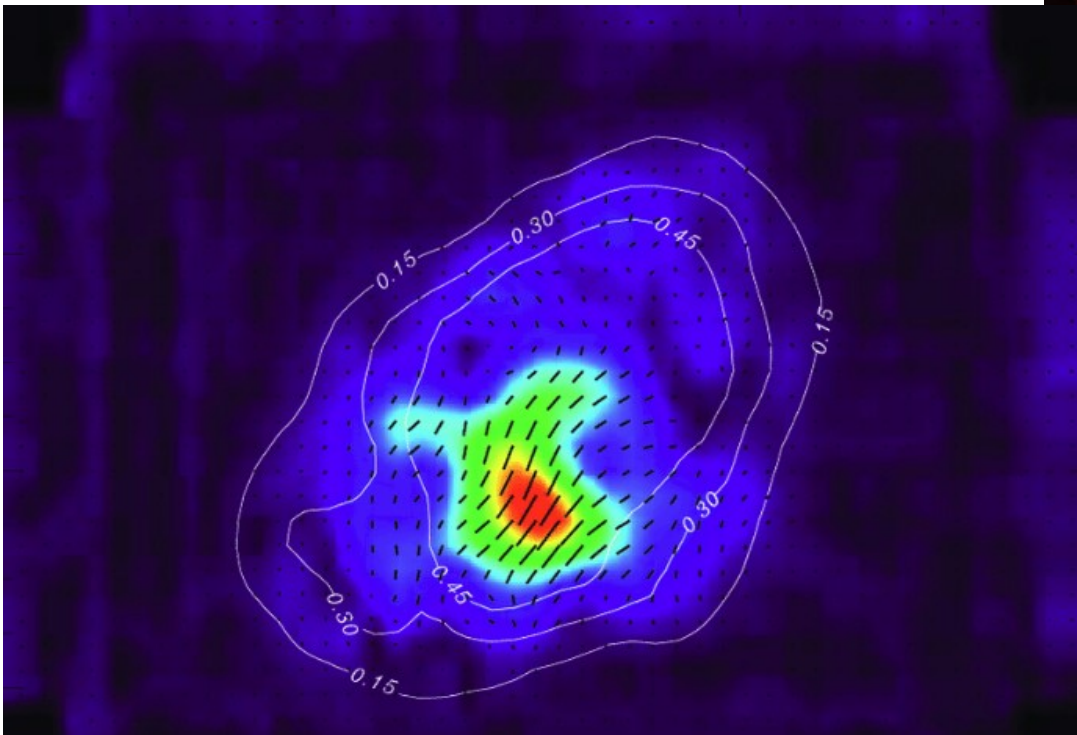
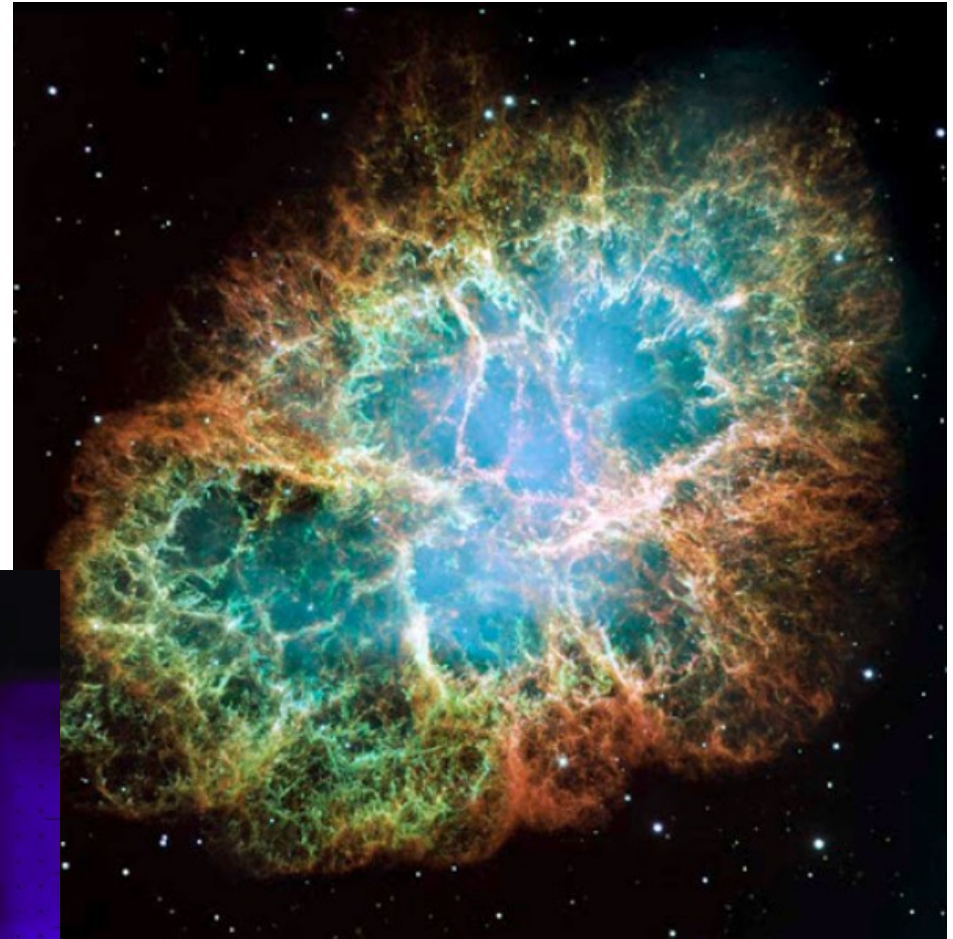


პოლარიზებული გამოსხივების წყაროები

კობირჩხალას ნისლეული

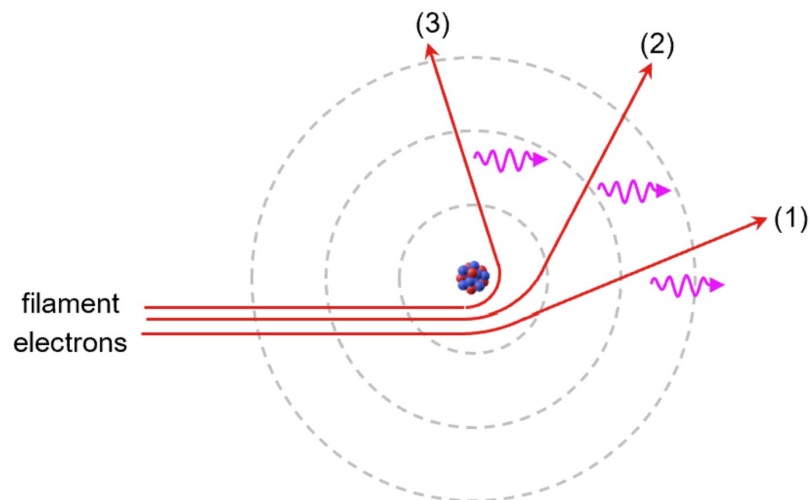
ზეახალის ნარჩენი (SN1054)

პოლარიზაციის ინტენსივობა: P



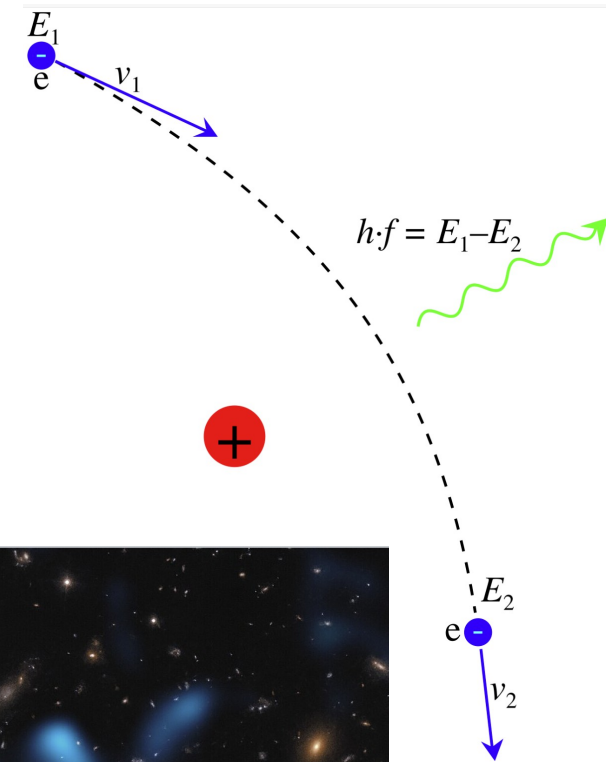
არა-სითბური გამოსხივება დამუხრუჭებით (Bremsstrahlung)

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

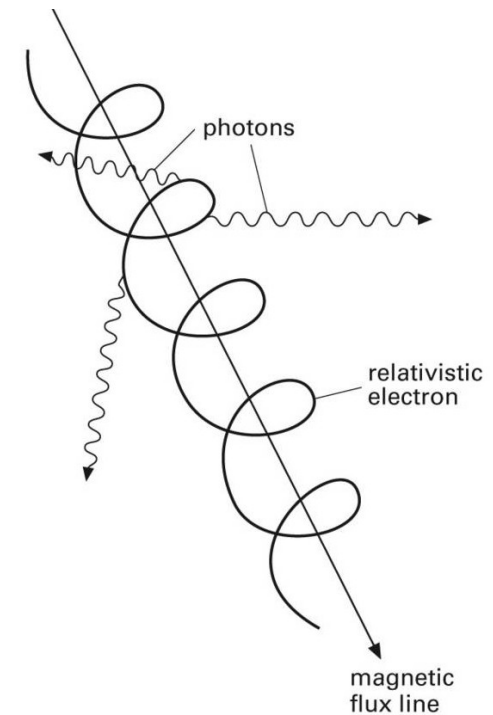
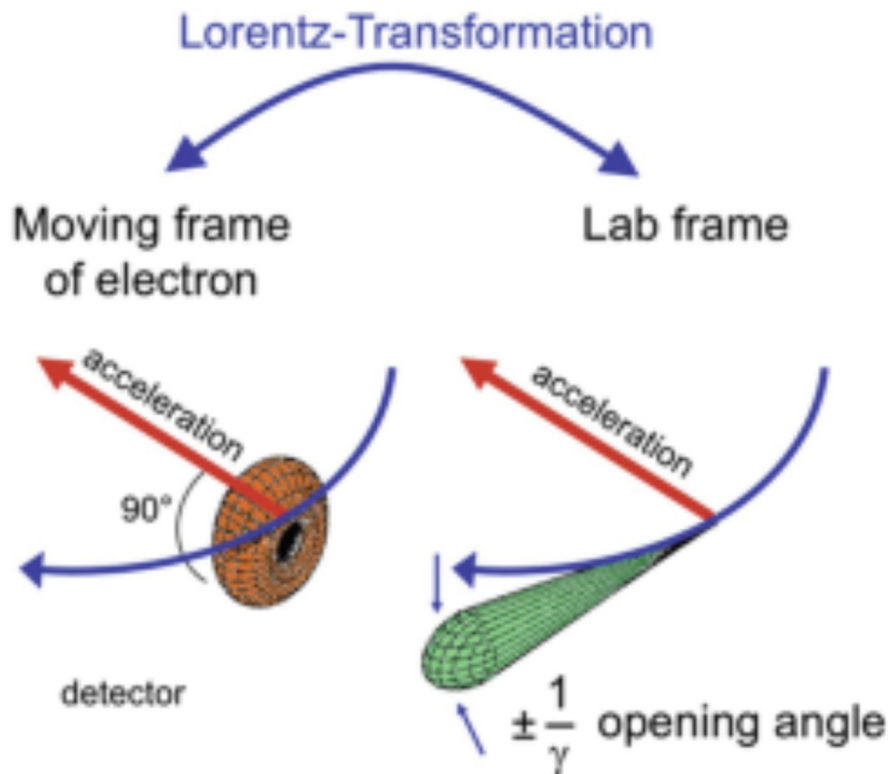
დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედებს სიჩქარის პერპენდიკულარული ლორენცის ძალა.
ნაწილაკი განიცდის გირაციას: ბრუნავს წარმოსახვითი მაგნიტური ველის ძალწირის გარეშე.

ბრუნვა -> აჩქარებული მოძრაობა -> გამოსხივება

ელექტრონის გირაციის სიჩქარე:

კლასიკური: ციკლოტრონული გამოსხივება;

რელატივისტური: სინქროტრონული გამოსხივება;



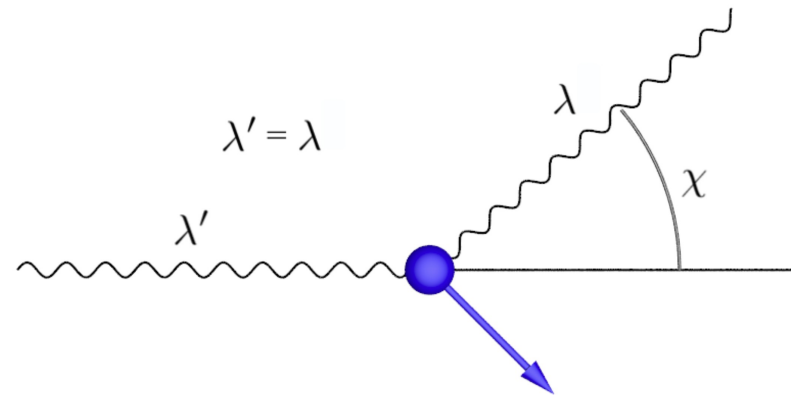
ციკლ.: Solar flares, magnet. of planets and stars

სინქრ.: Crab Nebula, radio galaxies, AGN jets

ფოტონის ელექტრონზე გაფანტვა

ტომპსონის ეფექტი: ფოტონის ელექტრონზე **დრეკადი** გაფანტვა;

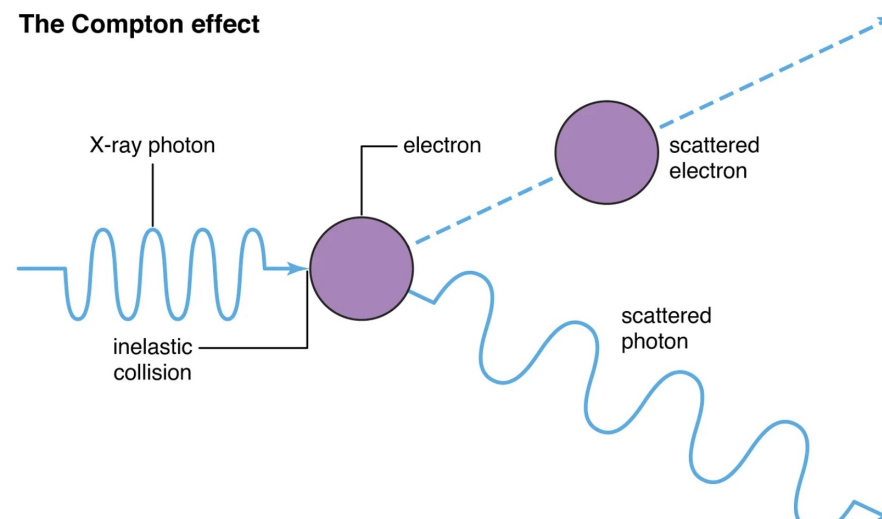
$$h\nu \ll m_e c^2$$



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

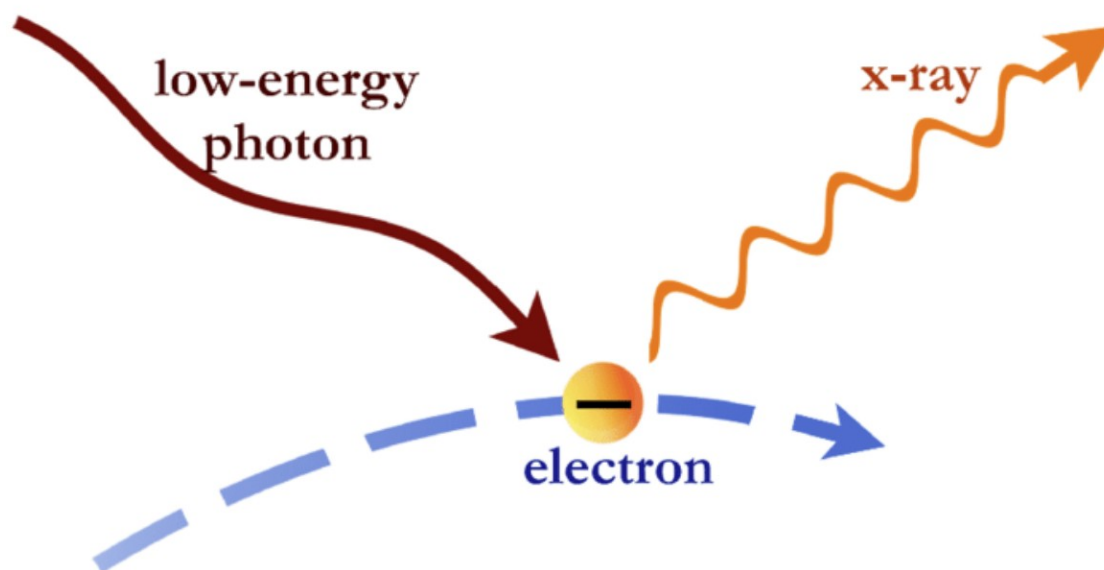
$$h\nu \sim m_e c^2$$

The Compton effect



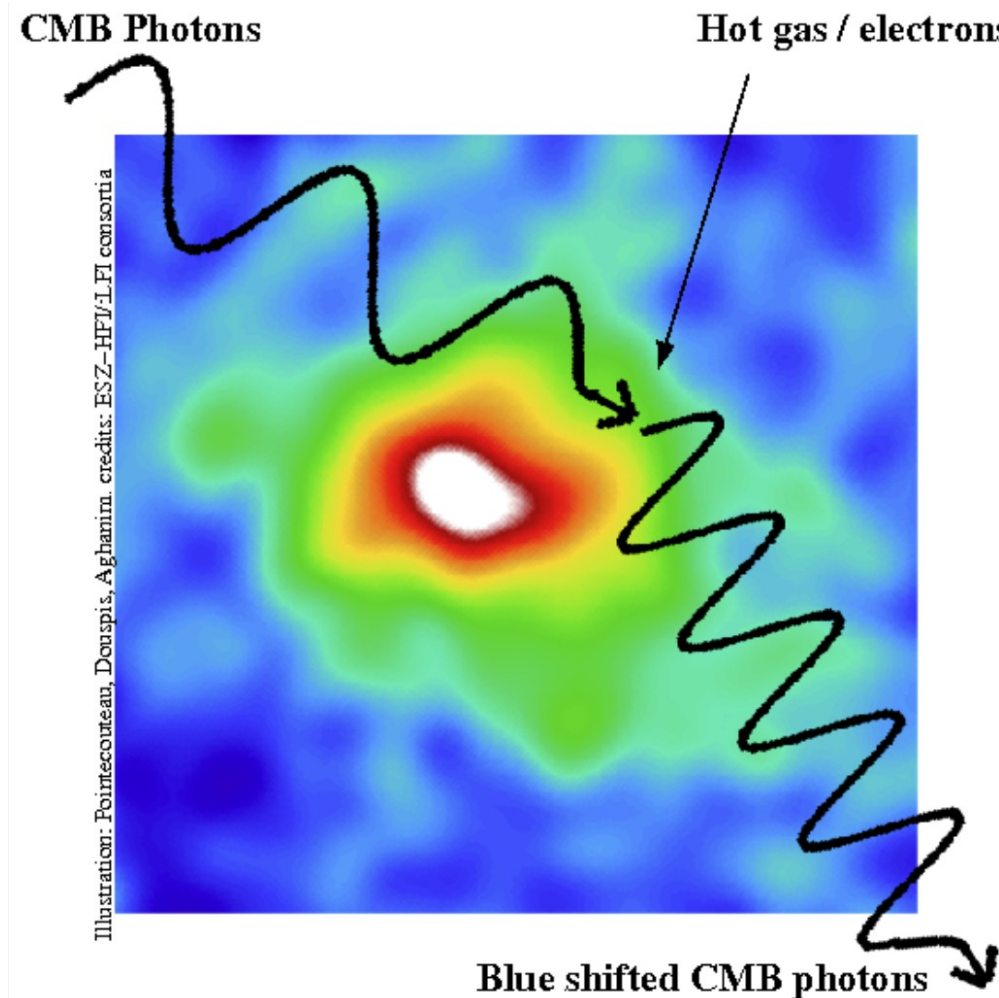
შებრუნებული კომპტონის გაფანტვა

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



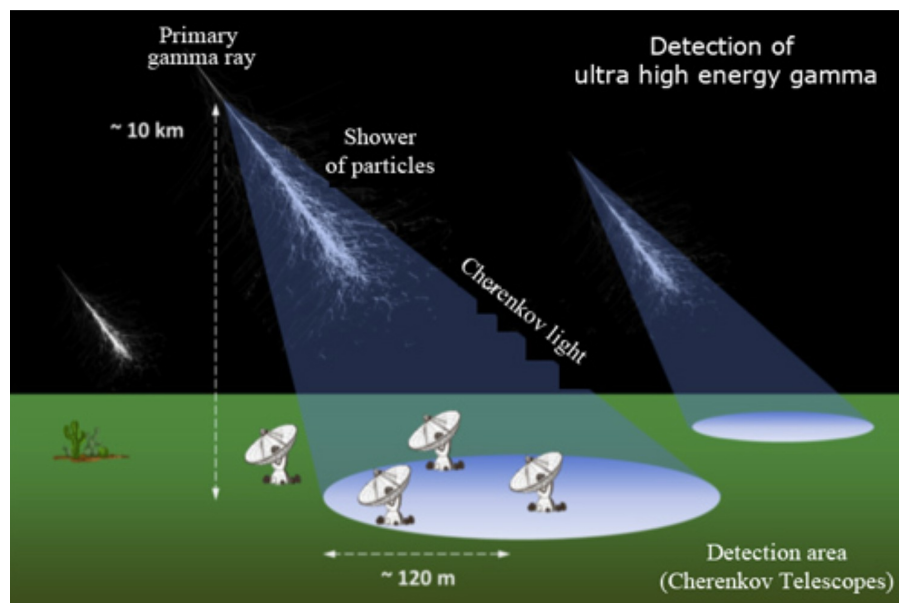
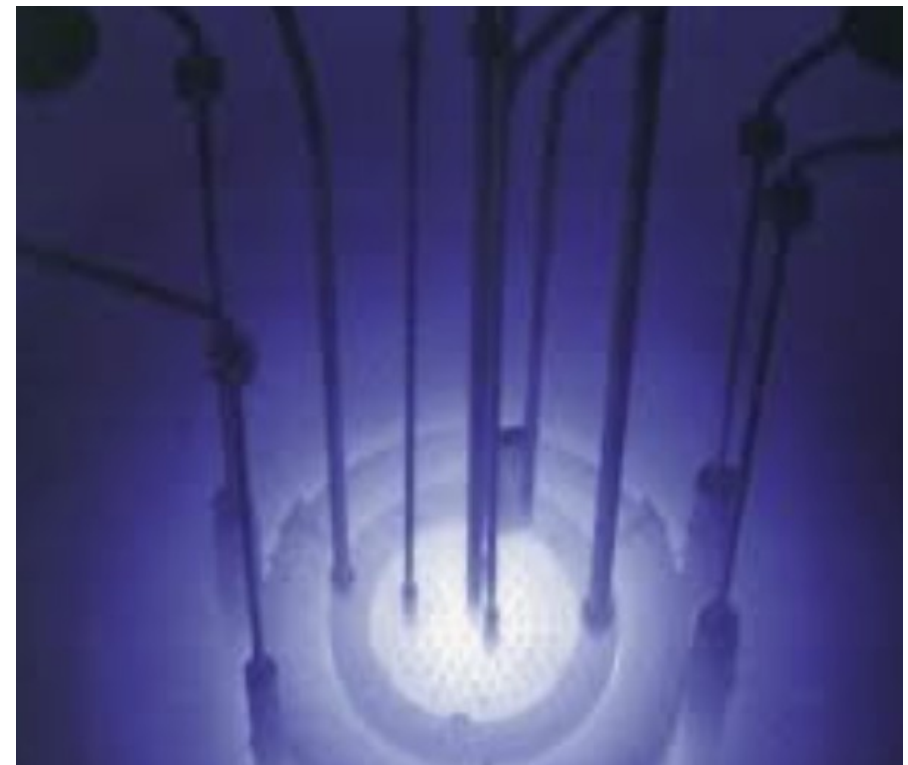
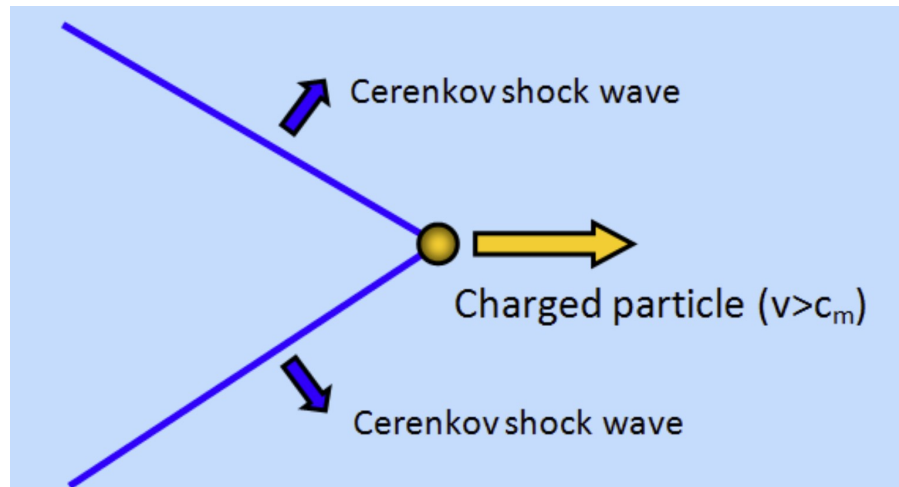
სიუნიაევ-ზელდოვიჩის ეფექტი

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



ვაკილოვ-ჩერენკოვის ეფექტი (გამოსხივება)

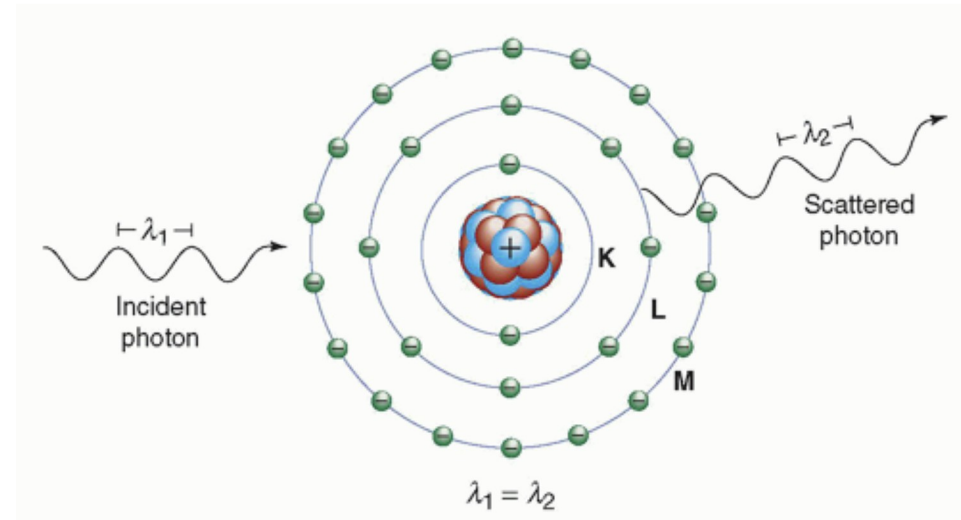
დამუხტული ნაწილაკი განიცდის დამუხრუჭებას (უარყოფით აჩქარებას), როდესაც იგი მოძრაობს გარემოში ლოკალურ სინათლის სიჩქარეზე უფრო სწრაფად.



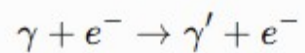
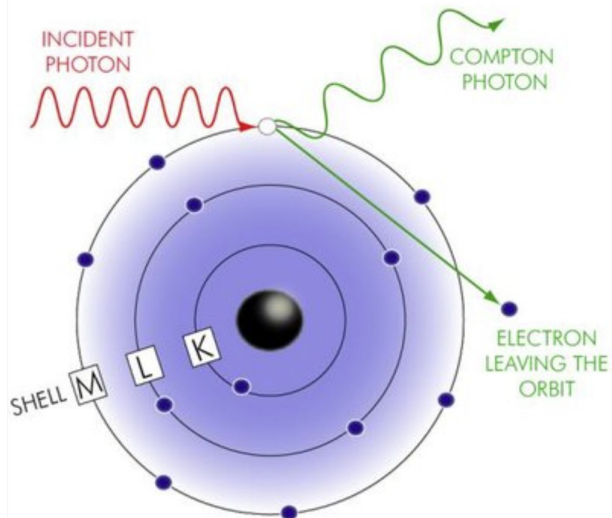
რელის გაფანტვა

ფოტონის ატომზე **დრეკადი** გაფანტვა.

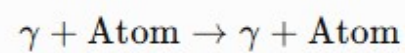
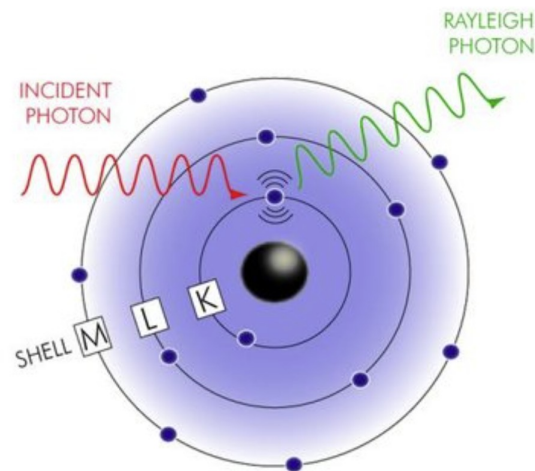
კომპტონი: გაფანტვა ელექტრონზე;
რელი: გაფანტვა ატომზე



COMPTON SCATTERING



RAYLEIGH SCATTERING



რატომ არის ცა ლურჯი?

რამანის გაფანტვა

ფოტონის და მოლეკულაზე
არადრეკადი გაფანტვა

მოლეკულის შიდა რხევითი ან ბრუნვითი
ენერგიის:

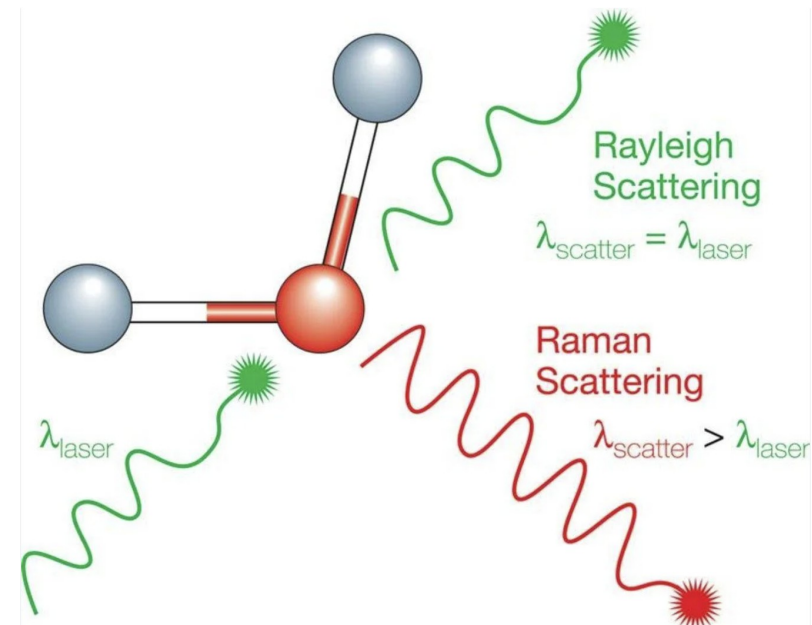
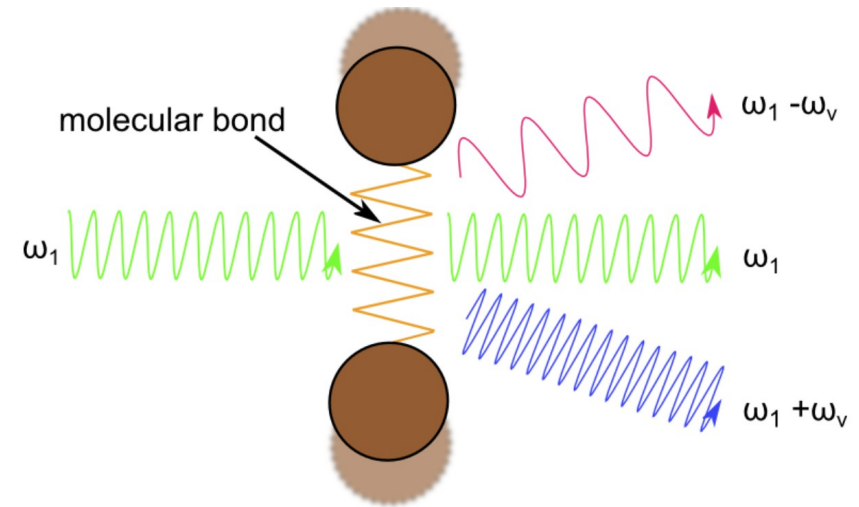
აღგზნება - ფოტონის გაწითლება;

ჩახშობა - ფოტონის გალურჯება;

მოლეკულაზე სინათლის გაფანტვა:

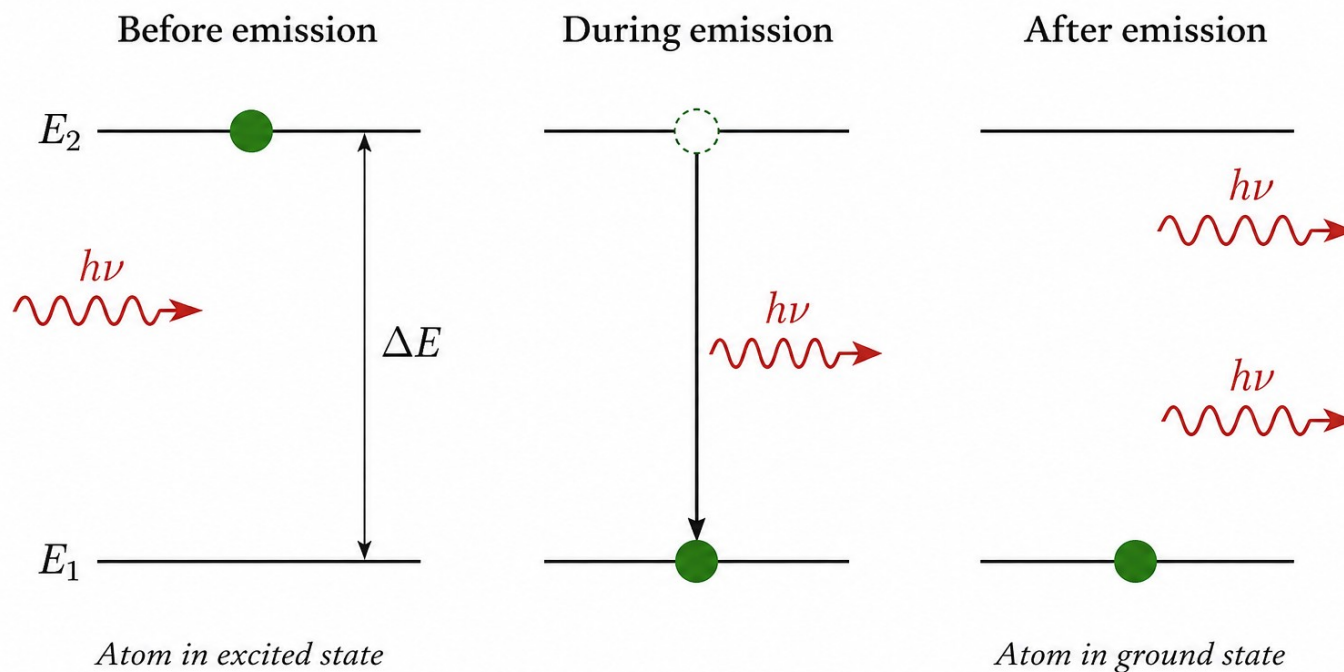
დრეკადი: რეელის გაფანტვა

არადრეკადი: რამანის გაფანტვა;



ლაზერი

LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

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

კოჰერენტული გამოსხივების ინტენსივობა

გამოსხივების ამპლიტუდა და ინტენსივობა (ენერგია):

ამპლიტუდა: ტალღის ამპლიტუდების ჯამი:

$$E_{\text{tot}} = E_1 + E_2 + \dots + E_N \sim N E_0.$$

კოჰერენტული გამოსხივების ინტენსივობა:

$$I \propto |E|^2,$$

$$I_{\text{coh}} \sim N^2$$

არაკოჰერენტული (შემთხვევითი ფაზით შეკრება):

$$I \propto \sum_i |E_i|^2 + \sum_{i \neq j} E_i E_j^*, \quad \langle E_i E_j^* \rangle = 0 \quad (i \neq j).$$

$$I_{\text{incoh}} \sim N$$

გამოსხივების **კოჰერენტული გაძლიერება!**

ასტროფიზიკური მაზერი

MASER - microwave amplification by stimulated emission of radiation

მიკროტალღოვანი ლაზერი;

ბუნებრივად ოპტიკურად ადგზნებულ მდგომარეობაში მყოფი მოლეკულები:

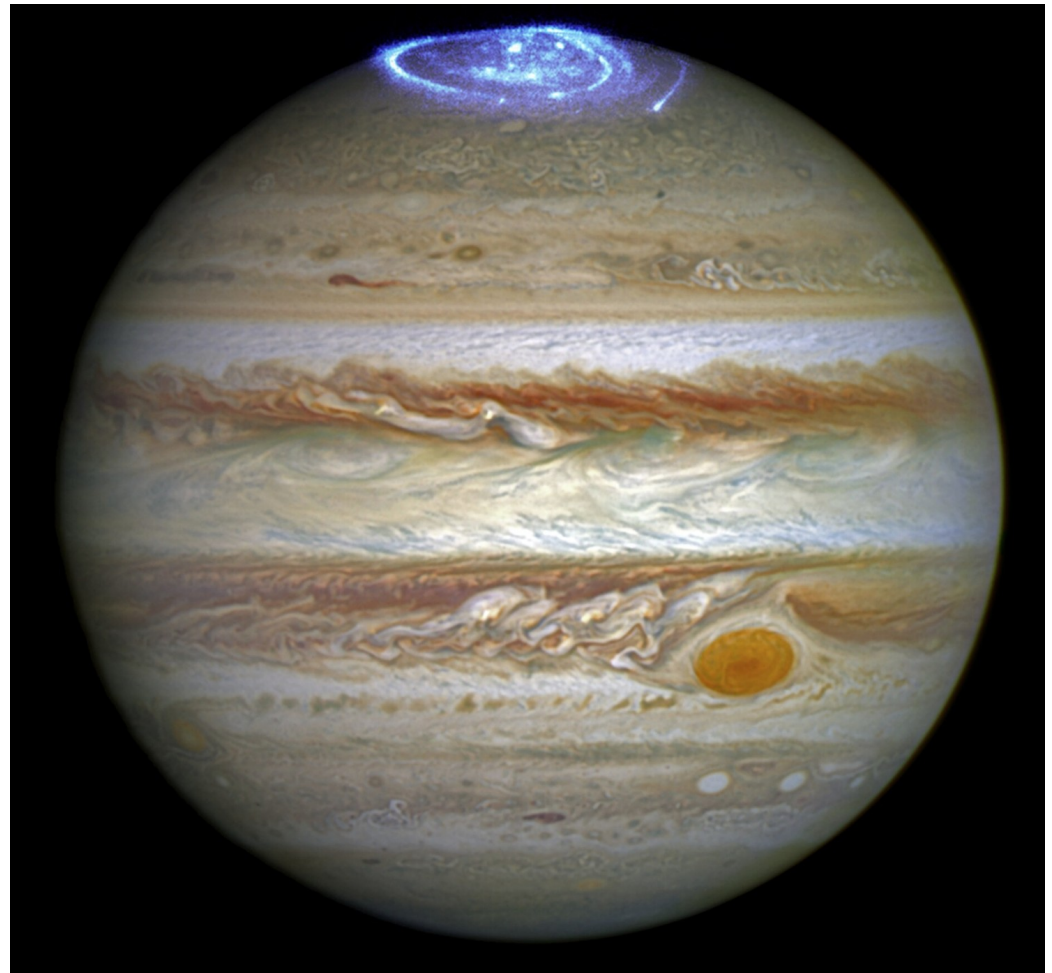
- H_2O , NH_3 , CH_3OH , SiO ...

გამოსხივების სიხშირე:

დაბალსიხ. ინფრაწითელი დიაპაზონი;

მაგალითი:

იუპიტერის
პოლარული
ნათება



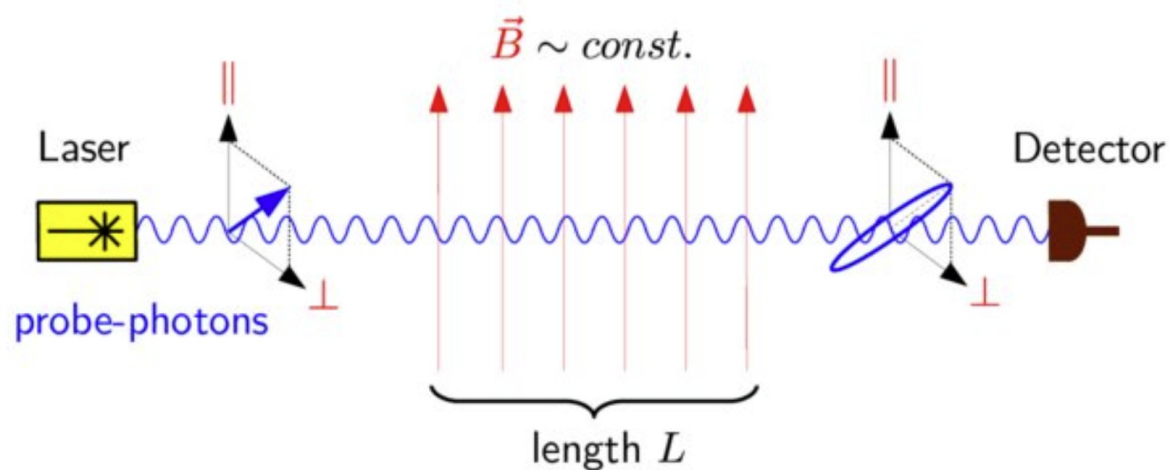
„ეგზოტიკური“ არასითბური წყაროები

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

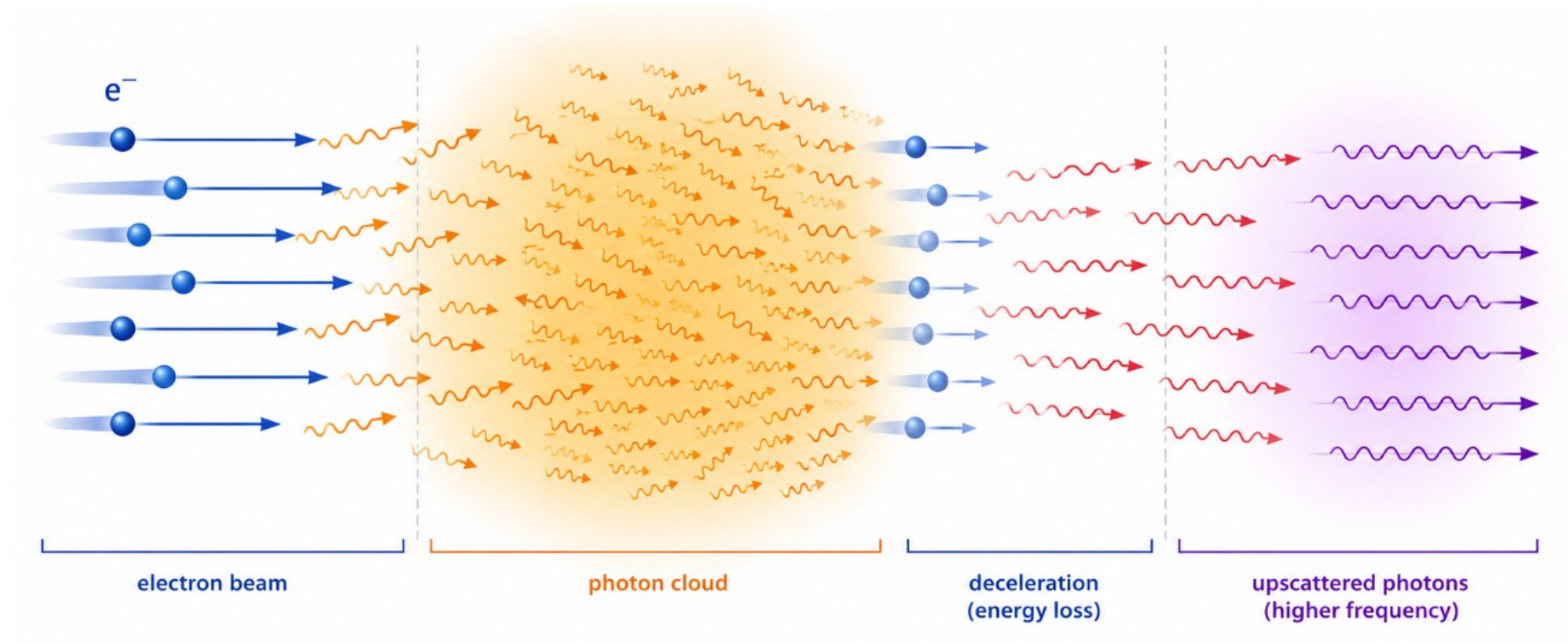
მაქსიმალური ინტენსივობა?

შებრუნებული კომპტონის გაფატნვა მაღალ ენერგიებზე: **კომპტონის კატასტოფა**

$$T_{\text{eff}} \sim 10^{12}\text{K}$$

რელატივისტური ელექტრონები სინქროტრონულად ასხივებენ ფოტონებს;
ელექტრონები ეჯახებიან სხვა ელექტრონების გამოსხივებულ ფოტონებს;
ელექტრონები მუხრუჭდებიან და გამოსხივებული ფოტონების სიხშირე მატულობს;

ცხელ ელექტრონებს ამუხრუჭებს საკუთარი გამოსხივება



გამოსხივების ზღვრები („კატასტროფები“)

მექანიზმი	ფიზიკური მიზეზი	შემზლუდავი სიდიდე	დამახასიათებელი ზღვარი
კომპტონის კატასტროფა	ფოტონები აგრილებენ რელატივისტურ ელექტრონებს	სიკაშკაშის ტემპერატურა	$\sim 10^{12} \text{ K}$
წყვილების წარმოქმნა	$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$	ფოტონის ენერგია	$\sim 1 \text{ TeV}^*$
სინქროტრონული გამოსხივების დამუხრუჭების ზღვარი	გამოსხივებით დანაკარგი აბალანსებს ნაწილაკის აჩქარებას	ფოტონის ენერგია	$\sim 100 - 200 \text{ MeV}$
ედინგტონის ზღვარი	გამოსხივების წნევა აბალანსებს გრავიტაციას	ნათობა	$L_{\text{Edd}} \simeq 1.3 \times 10^{38} (M/M_\odot) \text{ erg s}^{-1}$

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

