



პრაქტიკული ასტრონომიის კურსი 2026



ასტრონომიული წყაროების რელატივისტური აბერაცია

ალექსანდრე თევზაძე

საქართველოს ევგენი ხარაძის ეროვნული ასტროფიზიკური ობსერვატორია

13.08.2026



რელატივისტური დინებები სამყაროში

- რელატივისტური დინებები
- გამოსხივების აბერაცია
- რელატივისტური გარდაქმნები
- რელატივისტური აბერაციის მაგალითები
 - ✓ გამოვის ველოსიპედისტი
 - ✓ ტერელ-პენროუზის ბრუნვა
 - ✓ ზესხივური მოძრაობა
 - ✓ ლორენცის შუქურა
 - ✓ ლორენცის ცვალებადობა
 - ✓ ტურბულენტობის სპექტრის აბერაცია



რელატივისტური დინებები სამყაროში

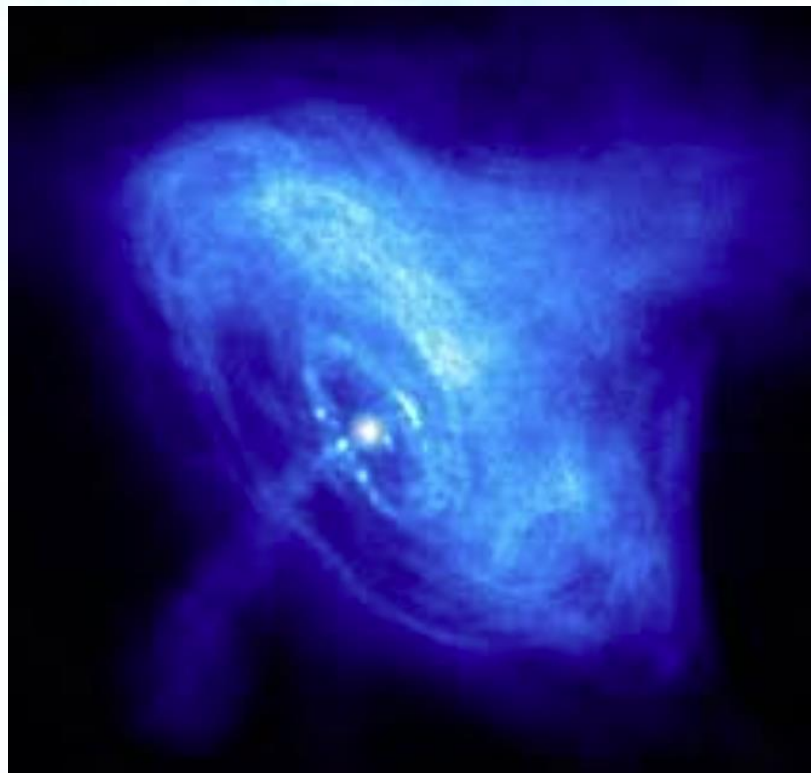
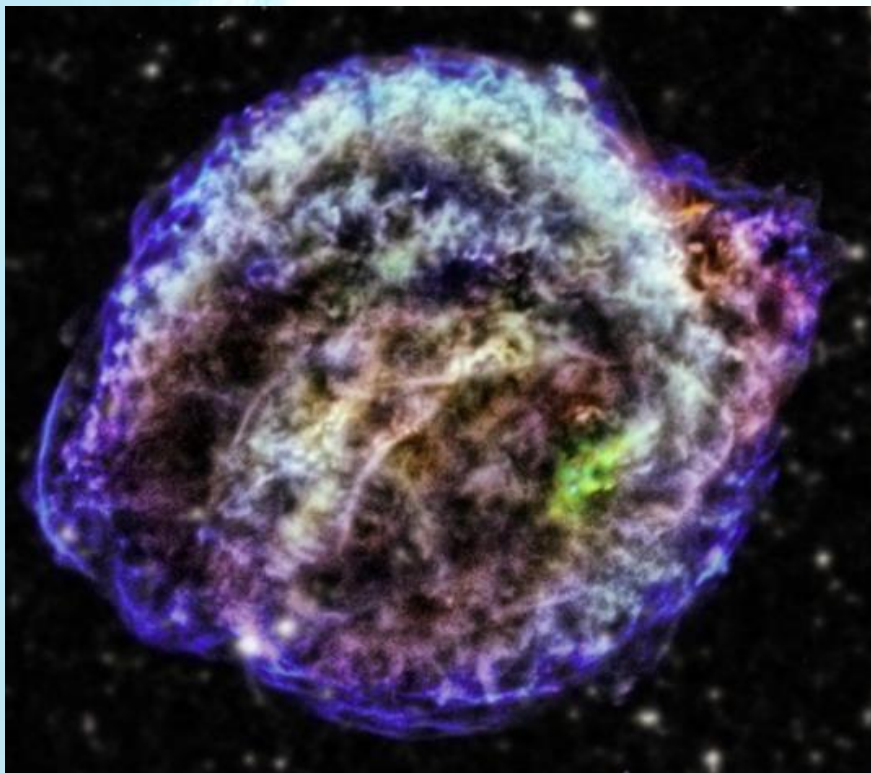
რელატივისტური დინებები ჩნდება, როდესაც გრავიტაცია, ბრუნვა ან მაგნიტური ველი აჩქარებენ ნივთიერებას სინათლის სიჩქარესთან შესადარ სიჩქარეებზე.
ენერგიის წყარო: გრავიტაციული ენერგია ($\sim mc^2$)!

ბლაზარები (რელ. ჯეტი ხედვის მიმართულებით)
კვაზარები (რელ. ჯეტი ხედვის მიმართ. მცირე კუთხით)
რადიო გალაქტიკები (თითქმის პერპენდ. ხედვის კუთხე)

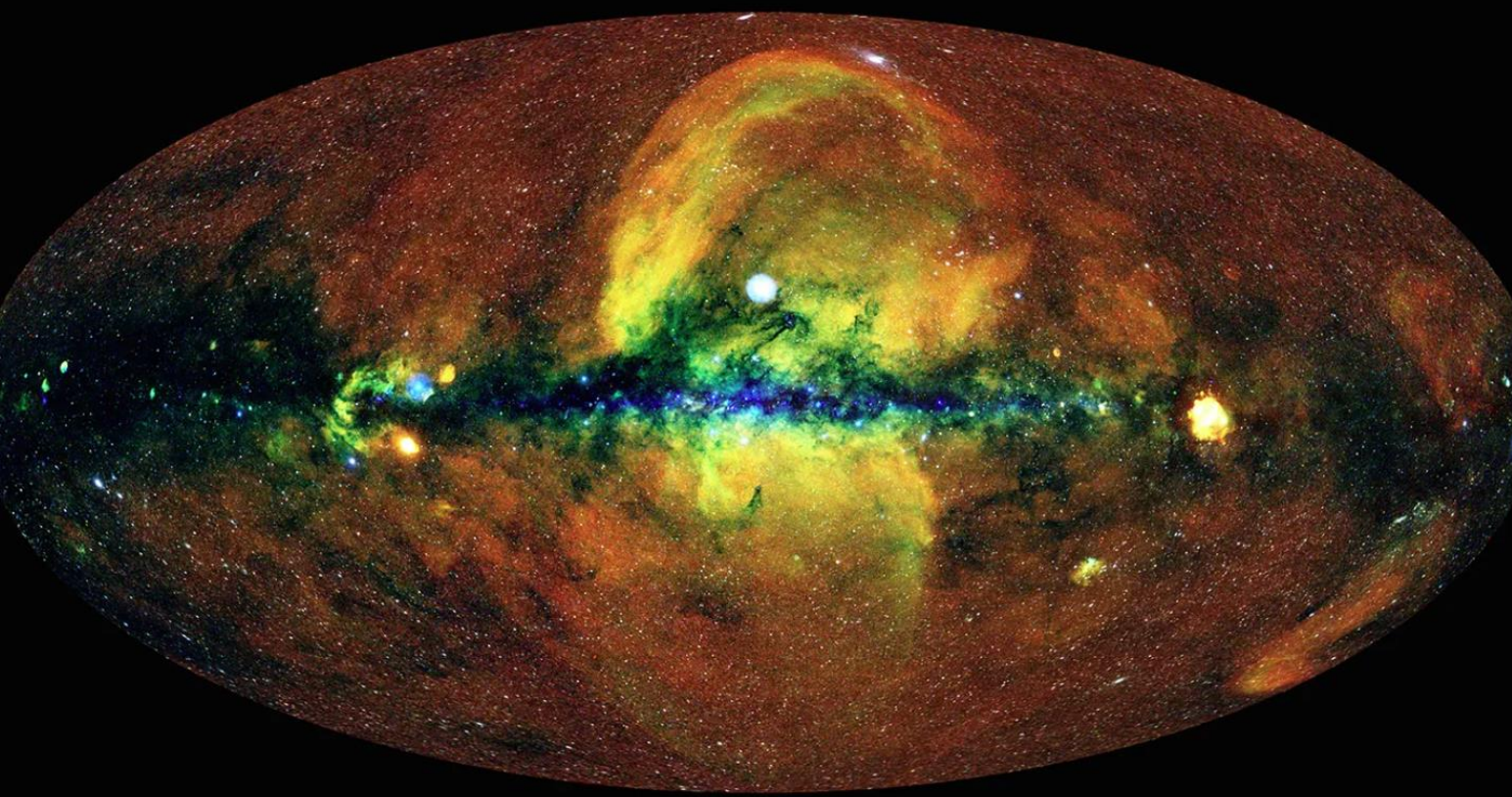
- შავი ხვრელების აკრეციული დისკები
- გამა გამოსხივების ჩქაფები (Gamma Ray Busts)
- პულსარის ქარი
- ზეახალის აფეთქების გარე შრის გაფართოება
- ...



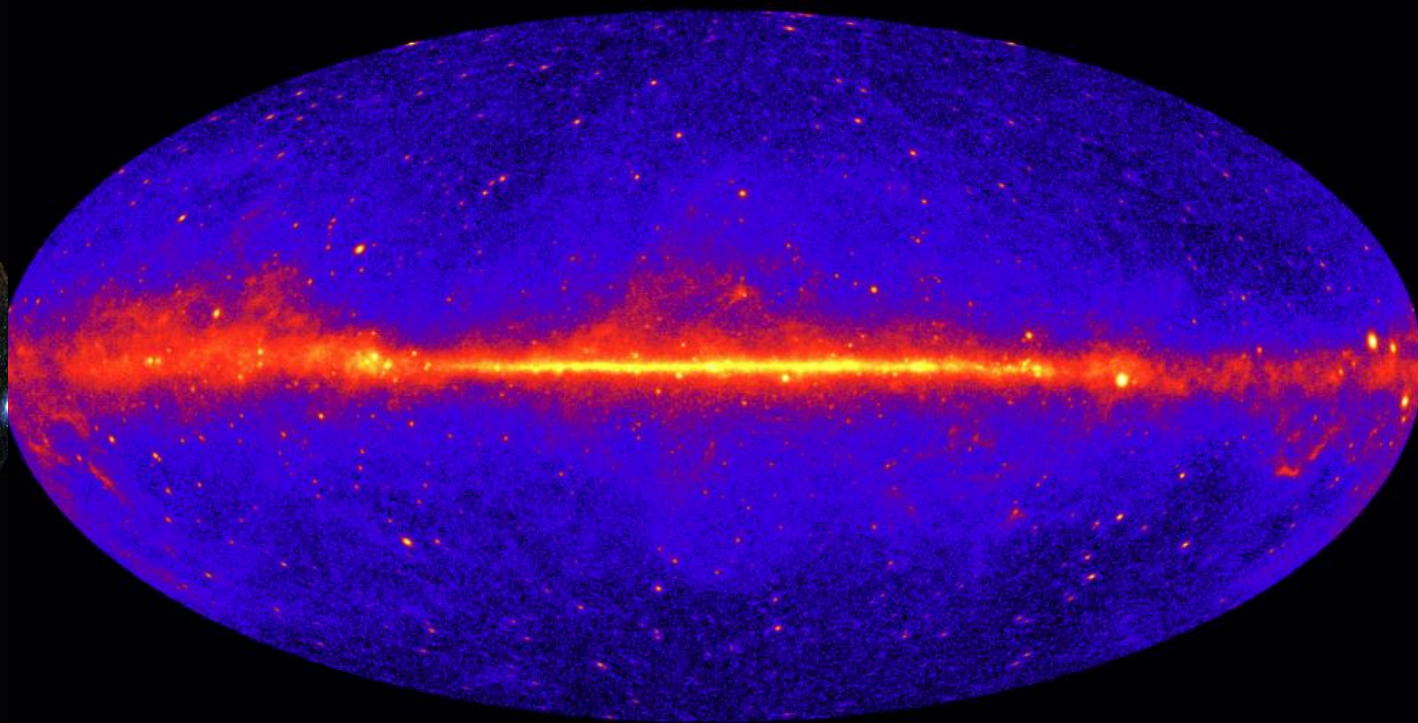
ზეახალი - პულსარის ქარი - აკრეციული დისკი



„ხისტი“ გამოსხივება



X-Ray

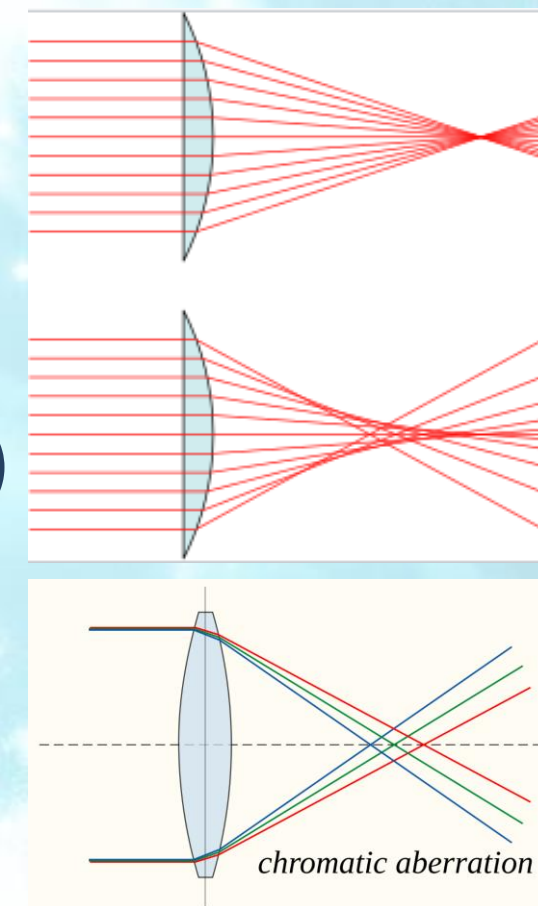


Gamma Ray

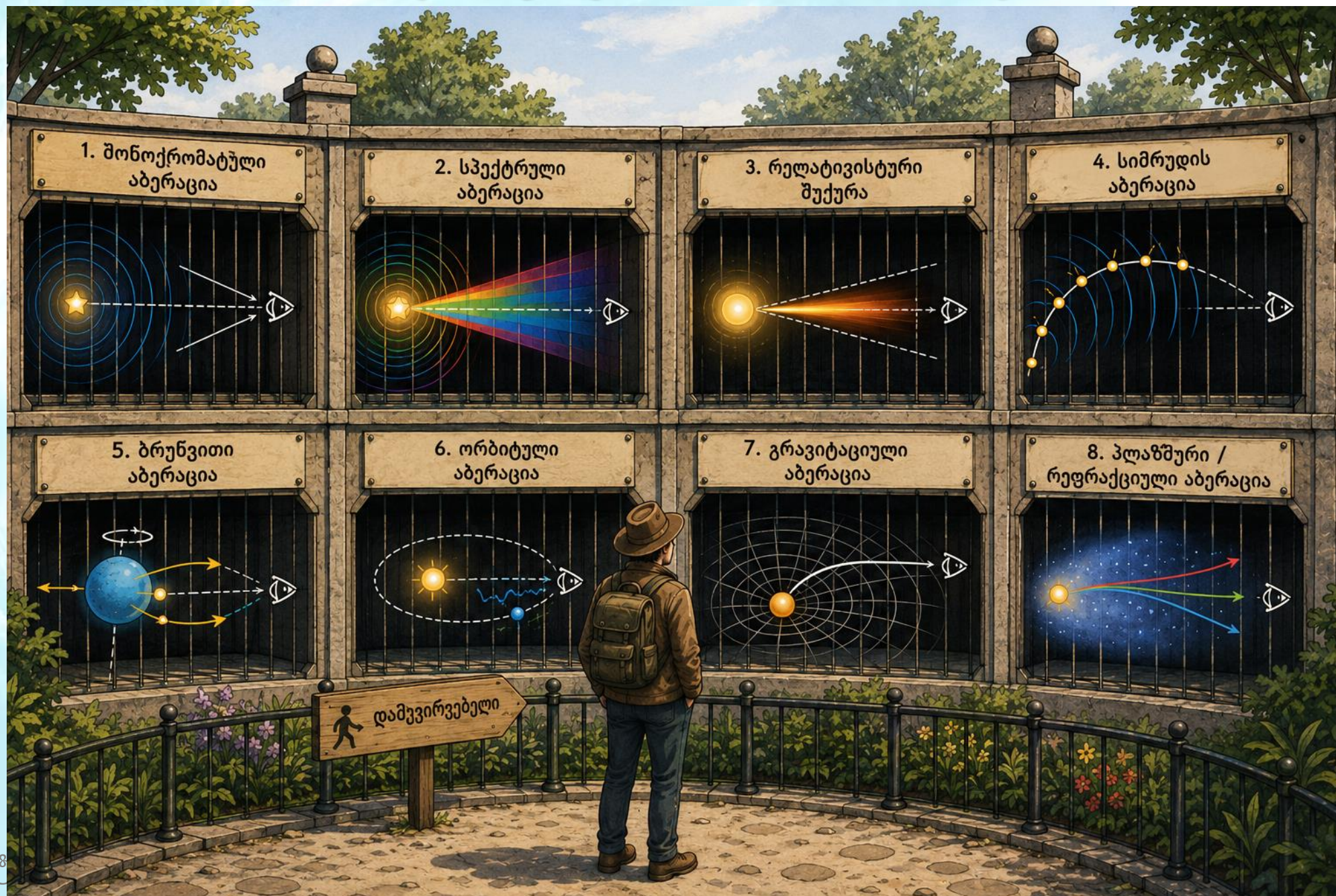
აბერაცია

დაკვირვებითი სიდიდის გადახრა საწყისი ან მოსალოდნელი მნიშვნელობიდან

- ✓ მონოქრომატული აბერაცია (სფერული, კომა, ასტიგმატიზმი,...)
- ✓ ქრომატული აბერაცია (დერძული, გასწვრივი)
- ✓ ასტრონ. აბერაცია (წლიური, სეკულარული)
- ✓ პლაზმური აბერაცია (დისპერსია, რეფრაქცია, ფარადეის ბრუნვა,...)
- ✓ გრავიტაციული აბერაცია (ლინზირება, წითელი წან., პოლ. ბრუნ.)
- ✓ რელატივისტური აბერაცია



აბერაციების „ზოოპარკი“





რელატივიზმი: ლორენცის გარდაქმნა

ლორენცის გამა ფაქტორი:

$$\beta \equiv \frac{v}{c}, \quad \Gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

სიჩქარე (v)	Gamma
0.5 c	1.15
0.9 c	2.3
0.99 c	7
0.999 c	20
0.9999 c	70

ულტრა რელატივისტური რეჟიმი: $\Gamma \gg 1$:

ლორენცის კოორდინატთა გარდაქმნა:

$$V = Vx \longrightarrow (1D)$$

$$\begin{aligned} x' &= \Gamma(x - vt), \\ t' &= \Gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right), \\ y' &= y, \quad z' = z, \end{aligned}$$



ლორენცის კოორდინატთა გარდაქმნა

ორი ინერციული სისტემის S და S' შორის, სადაც S' მოძრაობს სიჩქარით v სისტემის S მიმართ $+x$ ღერძის გასწვრივ.

ლორენცის გარდაქმნა (x -ღერძის გასწვრივ)

$$x' = \Gamma (x - vt)$$

$$t' = \Gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

სადაც

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Γ – ლორენცის ფაქტორი
($\Gamma \geq 1$)

S' სისტემა მოძრაობს სიჩქარით v სისტემის S მიმართ $+x$ ღერძის გასწვრივ.

ერთი და აცივე მოვლენა P ორ სისტემაში

კოორდინატები სისტემაში S : (ct, x, y, z)

კოორდინატები სისტემაში S' : (ct', x', y', z')

$$y' = y, \quad z' = z \quad (\text{უცვლელია})$$

სივრცე-დროის ინტერვანტი ინვარიანტულია

ინტერვალის ორნვე სისტემაში ერთნაირია:

$$c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = c^2 t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2$$

მთავარი შედეგები

დროის დაყოვნება



$$\Delta t' = \Gamma \Delta t$$

(Δt – საკითხი დრო)

სიგრძის შემცირება



$$L' = \frac{L}{\Gamma}$$

(L – საკითხის სიგრძე)

სინფლტანობის ფარდობითობა



$t' \neq t$ generally
(t' დამოფიცებულია x -ზე)

დოპლერის ეფექტი



$$v' = \Gamma (1 - \beta \cos \theta) v$$
$$\beta = v/c$$

სინათლის სიჩქარე ინვარიანტულია



$$c' = c$$

აღნიშვნები: v – ფარდობითი სიჩქარე c – სინათლის სიჩქარე Γ – ლორენცის ფაქტორი $\beta = v/c$ – უსახელი სიჩქარე



ზოგადი კონფიგურაცია

დამკვირვებლის მიმართ მოძრაობის სიჩქარე:

$$\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$$

ლორენცის გარდაქმნის 3-ვექტორული ფორმა:

$$t = \Gamma (t' + \beta \cdot \mathbf{r}') ,$$
$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \frac{\Gamma^2}{\Gamma + 1} (\beta \cdot \mathbf{r}') \beta + \Gamma \beta t'$$

4-ვექტორის კომპონენტები

$$x_\mu = (ct, -x, -y, -z)$$

$$x_0 = \Gamma (x'_0 + \beta_1 x'_1 + \beta_2 x'_2 + \beta_3 x'_3)$$

$$x_1 = x'_1 + \frac{\Gamma - 1}{\beta^2} (\beta_1 \beta_1 x'_1 + \beta_1 \beta_2 x'_2 + \beta_1 \beta_3 x'_3) + \Gamma \beta_1 x'_0$$

$$x_2 = x'_2 + \frac{\Gamma - 1}{\beta^2} (\beta_2 \beta_1 x'_1 + \beta_2 \beta_2 x'_2 + \beta_2 \beta_3 x'_3) + \Gamma \beta_2 x'_0$$

$$x_3 = x'_3 + \frac{\Gamma - 1}{\beta^2} (\beta_3 \beta_1 x'_1 + \beta_3 \beta_2 x'_2 + \beta_3 \beta_3 x'_3) + \Gamma \beta_3 x'_0$$

$$\mathbf{E} = \Gamma (\mathbf{E}' - \beta \times \mathbf{B}') - \frac{\Gamma^2}{\Gamma + 1} (\beta \cdot \mathbf{E}') \beta ,$$

$$\mathbf{B} = \Gamma (\mathbf{B}' + \beta \times \mathbf{E}') - \frac{\Gamma^2}{\Gamma + 1} (\beta \cdot \mathbf{B}') \beta .$$

სივრცითი და დროითი კოორდინატების ლორენც-შერევა (mixing)



რელატივისტური ეფექტები დაკვირვებებში

ადამიანის ინტუიცია არარელატივისტურია

- ლორენცის გარდაქმნების შედეგად მიღებული მარტივი შედეგები ხშირად ერთი შეხედვით მოულოდნელია
- სწრაფად მოძრავი ობიექტების გამოსხივება „ლორენცის ლინზაში“ უჩვეულოდ გამოიყურება
- გამოსხივების წყაროს საკუთარი თვისებების დასადგენად საჭიროა რელატივისტური აბერაციის ეფექტების უკუგარდაქმნა („კორექცია“)



რელატივისტური დინების კლასები სამყაროში

დინება

ობიექტი	Gamma
Supernova Ejecta	1 - 2
Type Ia Supernova	2-10
Radio Galaxies	5-10
Quasars	10-20
Blazars	10-50
GRB	100-1000

ნაწილაკების ნაკადი

obieqti	Typical Gamma
Cosmic-ray electrons	10^3-10^6
Pulsar wind pairs	10^4-10^6
AGN jet electrons	10^3-10^5
GRB shock electrons	10^4-10^6
Large Hadron Collider	7000-7500
Ultra High Energy Cosmic Rays (protons)	10^9-10^{11}

- რელატივისტური
- ულტრა-რელატივისტური



რელატივისტური აბერაციის მაგალითები

ლორენცის გარდაქმნით გამოწვეული არატრივიალური ეფექტები (აბერაცია)

ეფექტი	მექანიზმი
Superluminal Motion	სინათლის გავრცელების დროის პროექციის ეფექტი
Terrell–Penrose Rotation	რელატივიზმი და ერთდროულობა
Relativistic Beaming	კუთხური შეკუმშვა
Geometric Relativistic Aberration	კუთხეების გარდაქმნა
Doppler boosting	სიხშირის და ინტენსივობის გარდაქმნა
Lorenz variability/pulsations	დრო-სივრცის კოორდინატების შერევა



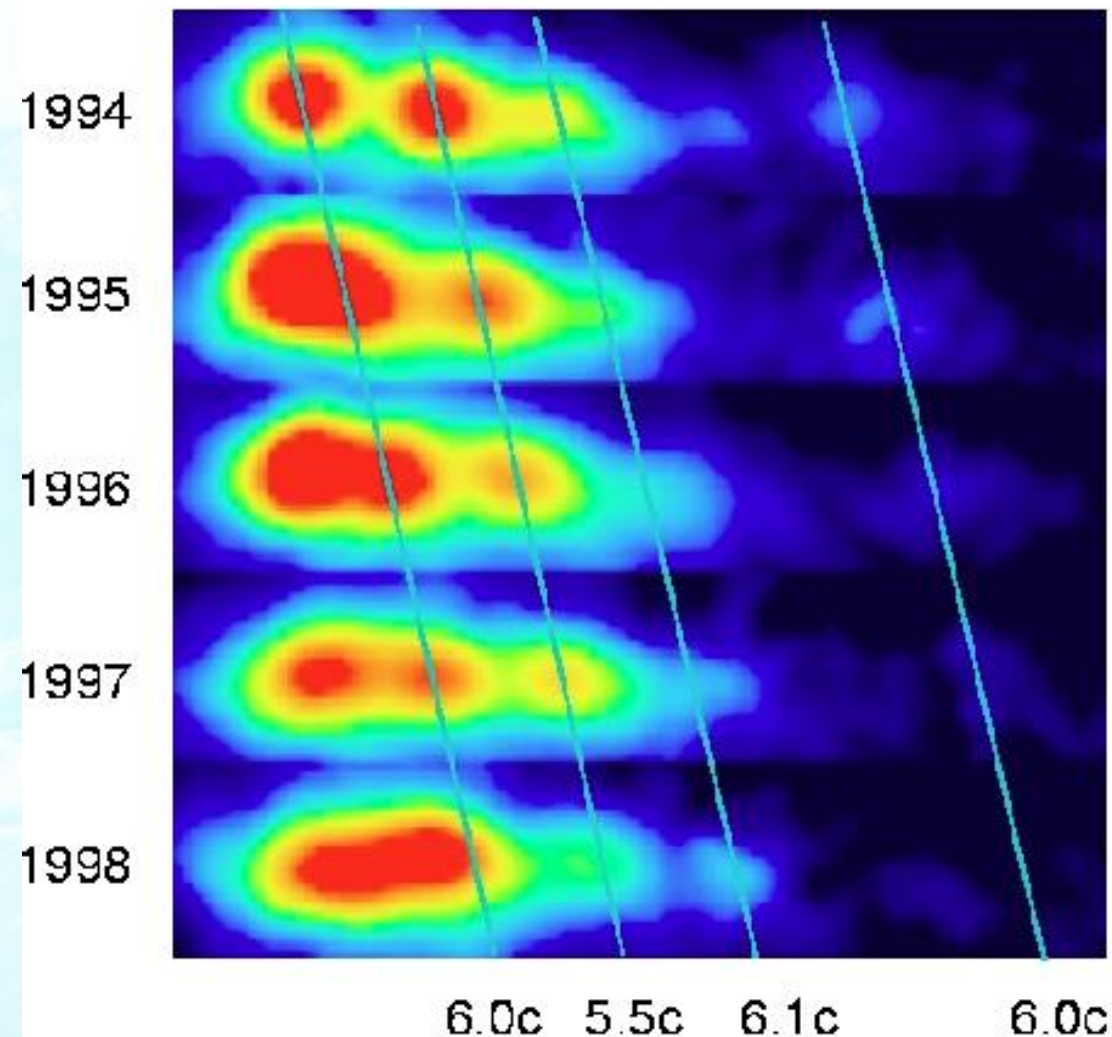
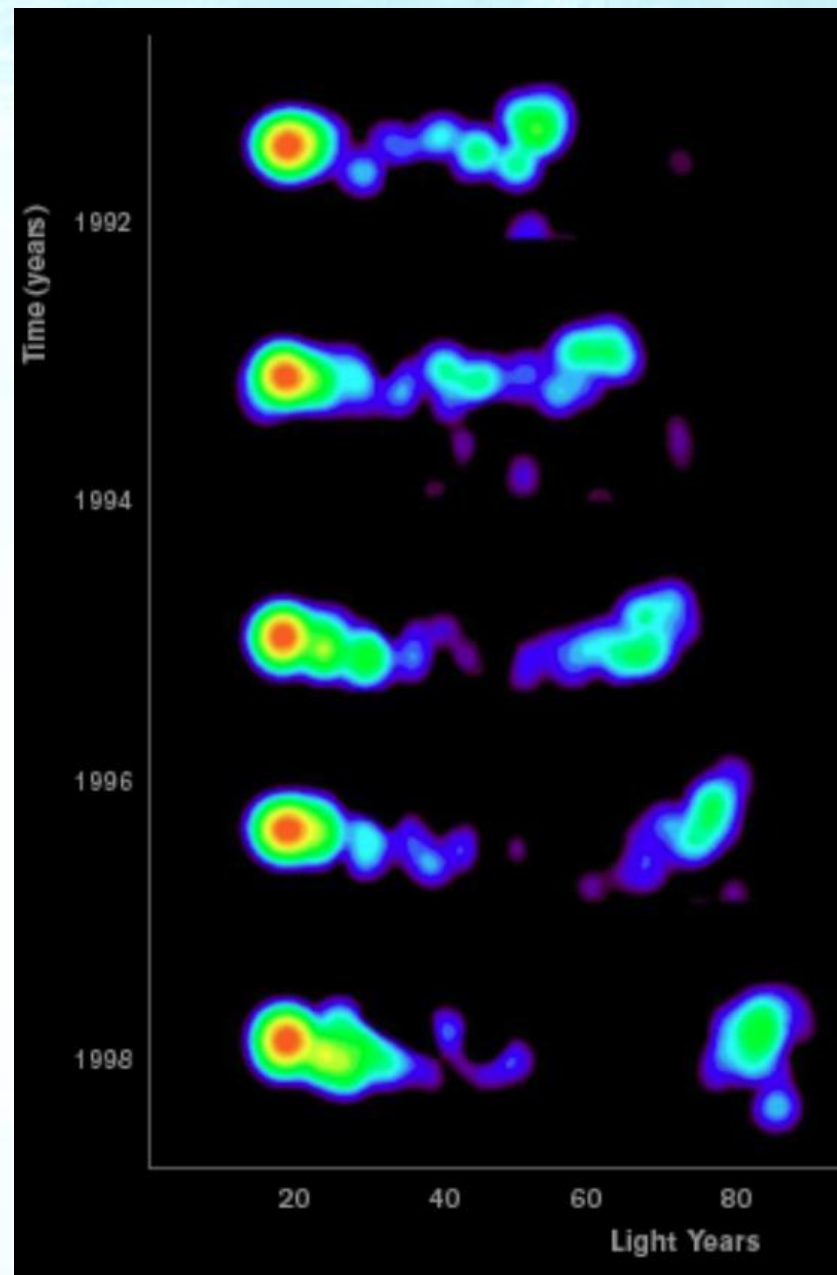
სინათლეზე სწრაფი „ხილული მოძრაობა“

Quasar 3C 279

($\sim 5c$, 1971)

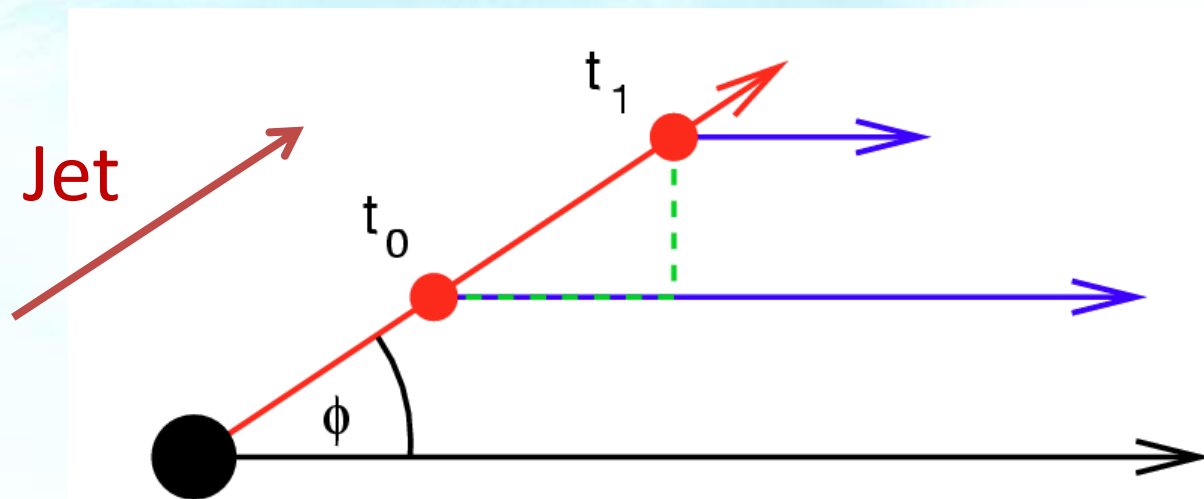
Superluminal!

+ სინათლეზე სწრაფი
გადაადგილება
ინფორმაციის
გადატანის გარეშე;
- სინათლეზე სწრაფი
მოძრაობა?



ზესხივური მოძრაობა

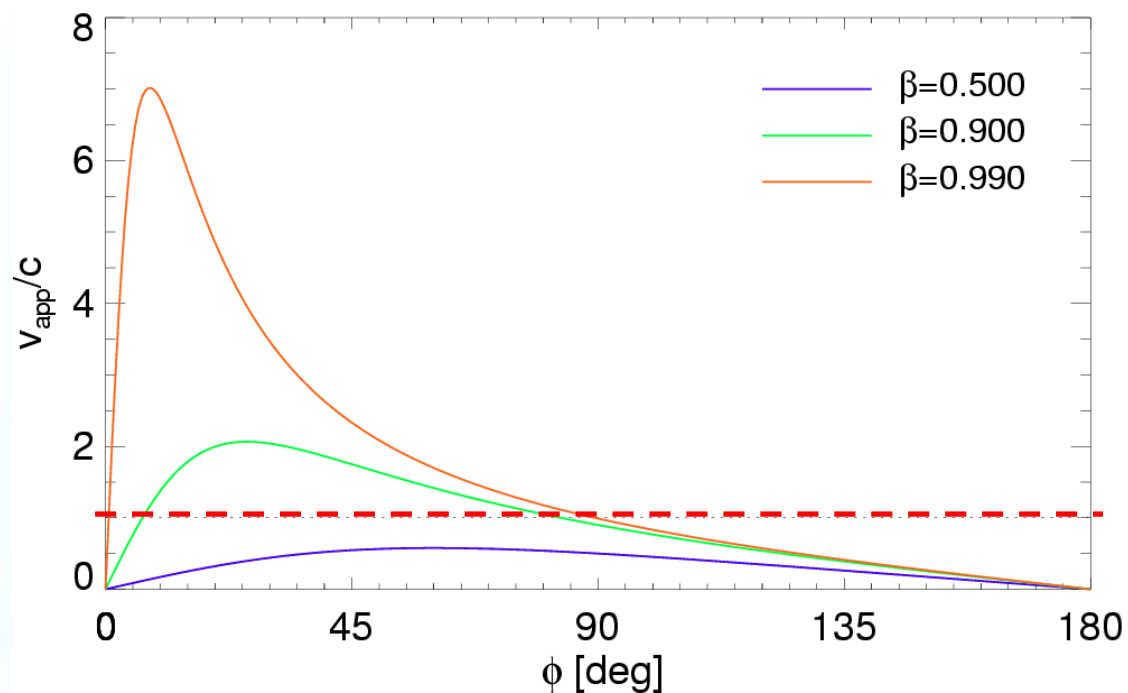
1. Relativistic Projection
2. Light Travel Distance



$$v_{app} = \frac{v \sin \theta}{1 - (v/c) \cos \theta}$$

$$v_{app} > c$$

$$\sin \theta \approx \frac{1}{\Gamma}$$



გამოვის ველოსიპედისტი

როგორ გამოიყურება რელატივისტური სიჩქარით მოძრავი ველოსიპედისტი
უძრავი დამკვირვებლისთვის?

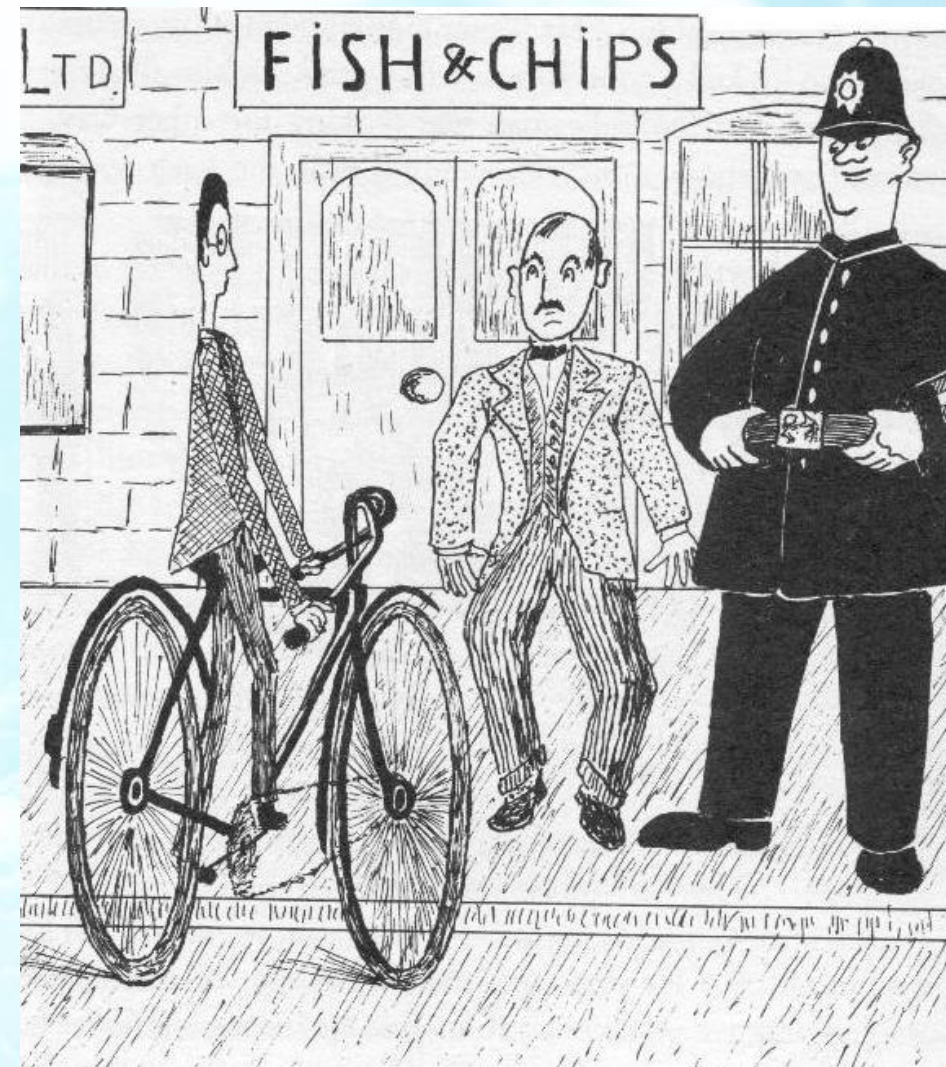
G. Gamow — *Mr Tompkins in Wonderland* (1939)

$C = 20 \text{ კმ/ს}$

- სიჩქარის გასწვრივი ზომის შემოკლება
- დროის შენელება
- რელ. დოპლერის ეფექტი

პრობლემა:

ობიექტს გააჩნია სასრული ზომა!



გამოვის ველოსიპედისტი

2D გამოვის ველოსიპედის
ფორმის რიცხვითი
მოდელირება:
რელატივისტური დეფორმაცია

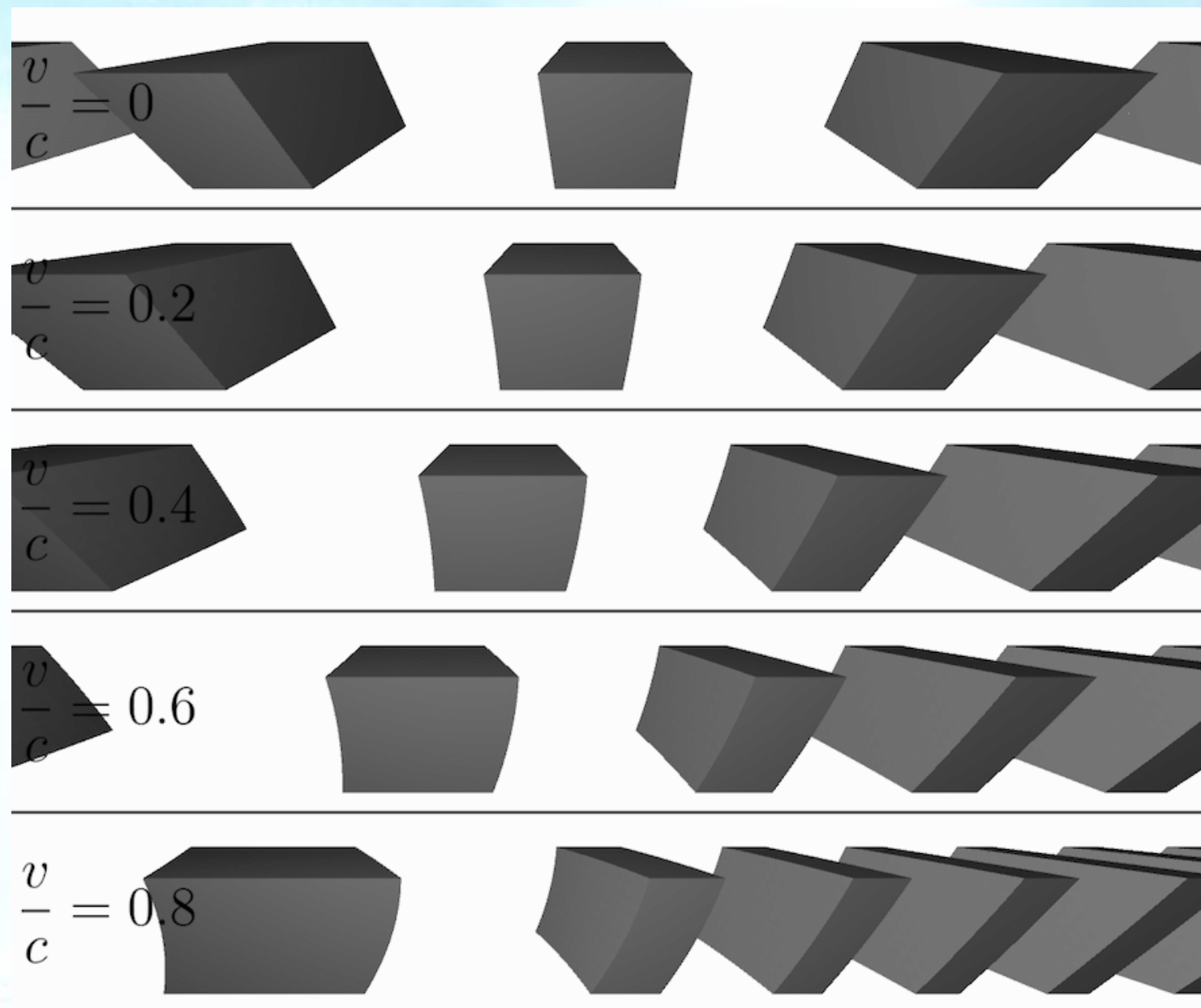
რა მოხდება თუ ველოსიპედს
აქვს სიგანეც (3D)?



ტ-პ „ბრუნვა“ (Terrell-Penrose “Rotation”)

სასრული ზომის 3D სხეულის
გეომეტრიის
ხილული ფორმა
რელატივისტური
სიჩქარით
მოძრაობისას:

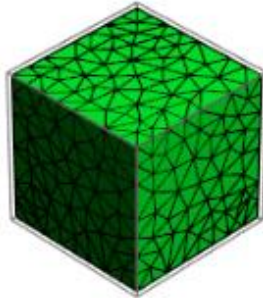
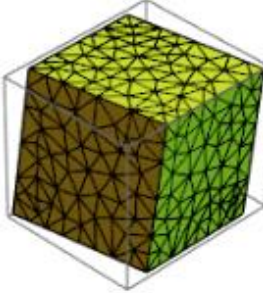
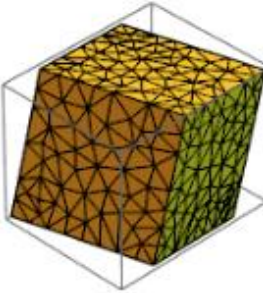
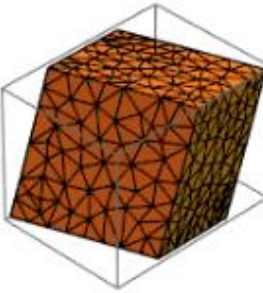
„დეფორმაცია და ბრუნვა“





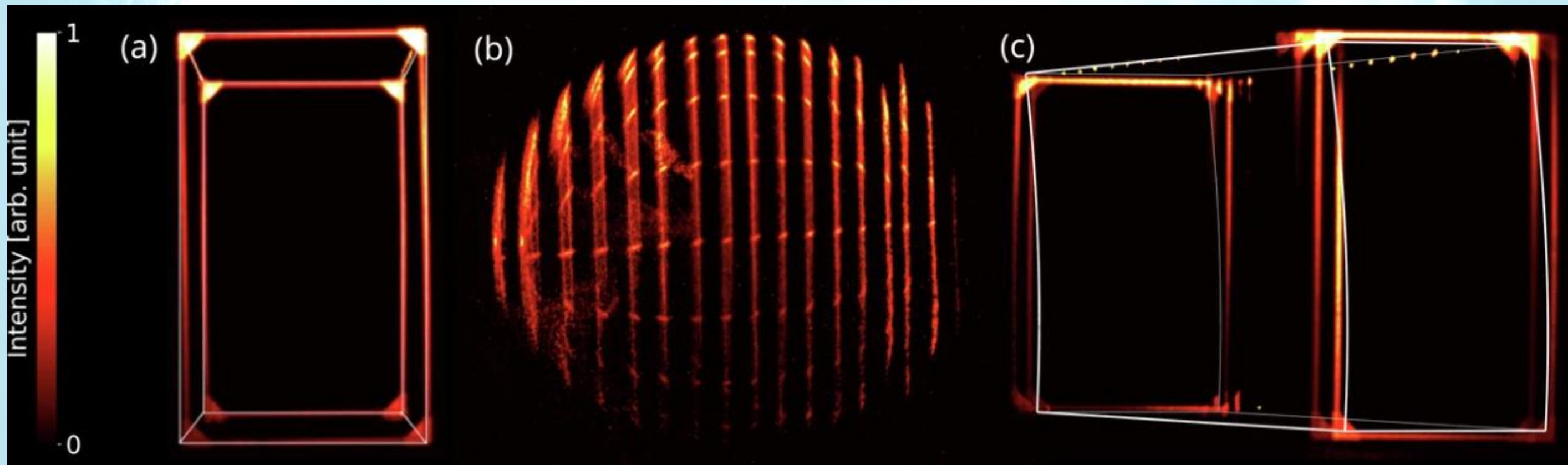
ტერელ-პენროუზის ეფექტი

სიჩქარისა და გეომეტრიულ
ღერძს შორის განსხვავებული
კუთხეები (Maple)

Velocity	Unit Cube
No Velocity	
1/3 of the Speed of Light	
2/3 of the Speed of Light	
Approximately the Speed of Light	

ტ-პ ბრუნვის ექსპერიმენტული ვიზუალიზაცია

ოპტიკური ექსპერიმენტი: $v_{\text{eff}} = 0.8 c_{\text{eff}}$



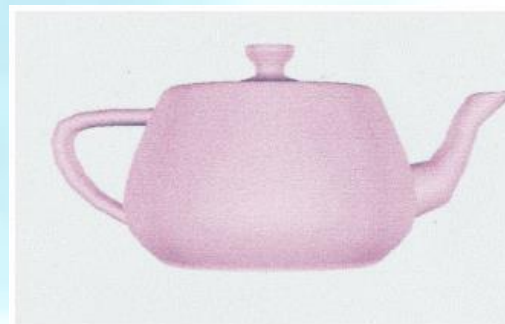
ტ-პ ბრუნვა

შეგვიძლია გეომეტრიული ობიექტების
უკანა მხარის ოპტიკური დაკვირვება?

ობიექტის თვისებების ცვლილება

- ✓ დინების მორფოლოგია
- ✓ ჯეტის კვანძები
- ✓ გაფართოებადი სფერული შრეები

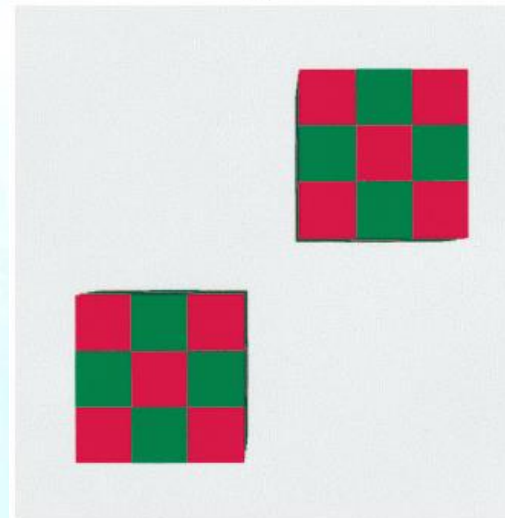
ერთდოულობის ფარდობითობის გამოვლინება



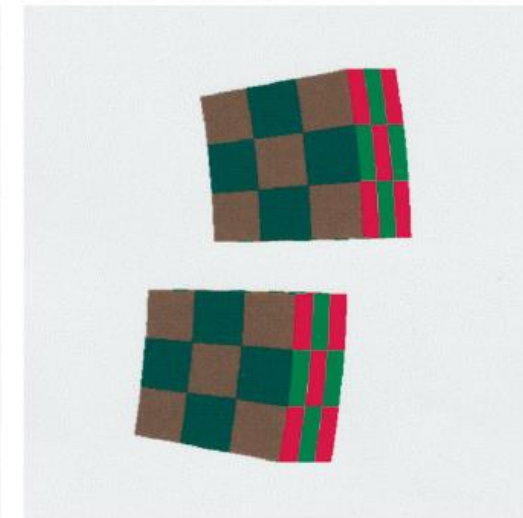
(a)



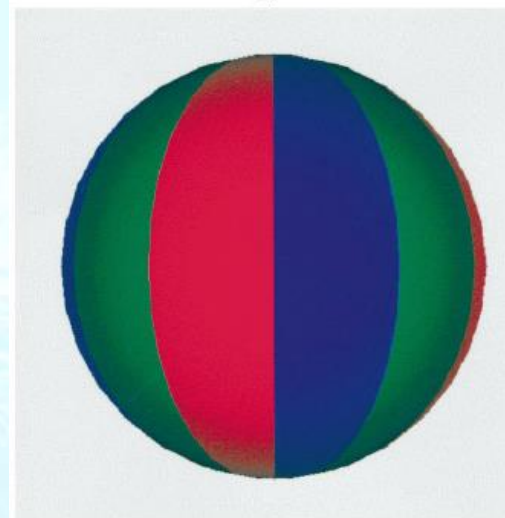
(b)



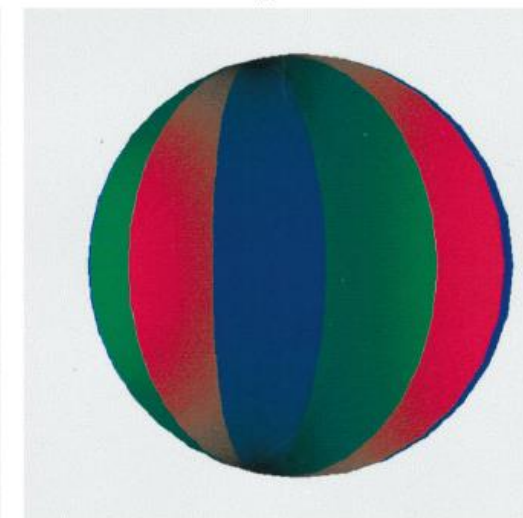
(c)



(d)



(e)

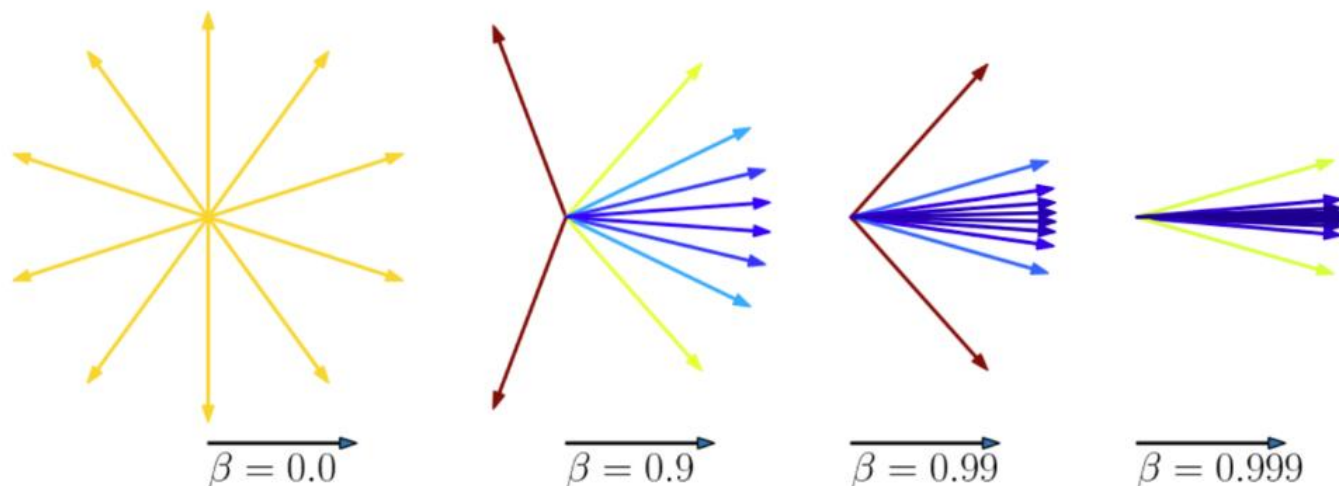


(f)

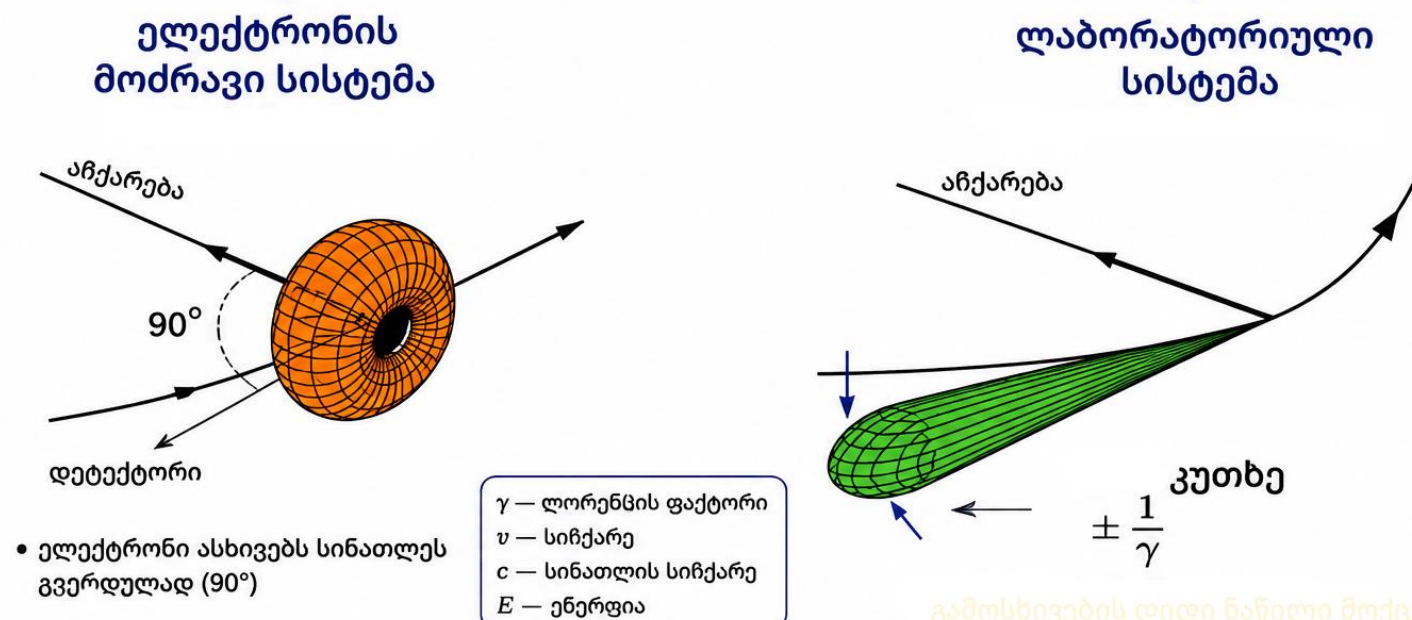
ლორენცის „შუქურა“

ლორენცის გარდაქმნა ელ.მაგ გამოსხივებისთვის “Lorenz Beaming”

1. ინტენსივობის კონუსური კონცენტრაცია;
2. სიხშირის რელატ. გაღურჯება



ლორენცის გარდაქმნა



$$\frac{1}{\gamma} = \frac{m_0 c^2}{E} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

რელატივისტური beaming
გამოსხივების დიდი ნაწილი მიმართულია მოძრაობის მიმართულებით ღია კონუსში, კუთხეა $\sim 1/\gamma$.

გამოსხივების დიდი ნაწილი მოქცეულია „შუქურის“ (beaming) კუთხეში

$$\phi \sim 1/\Gamma$$

„ლორენცის ცვალებადობა“

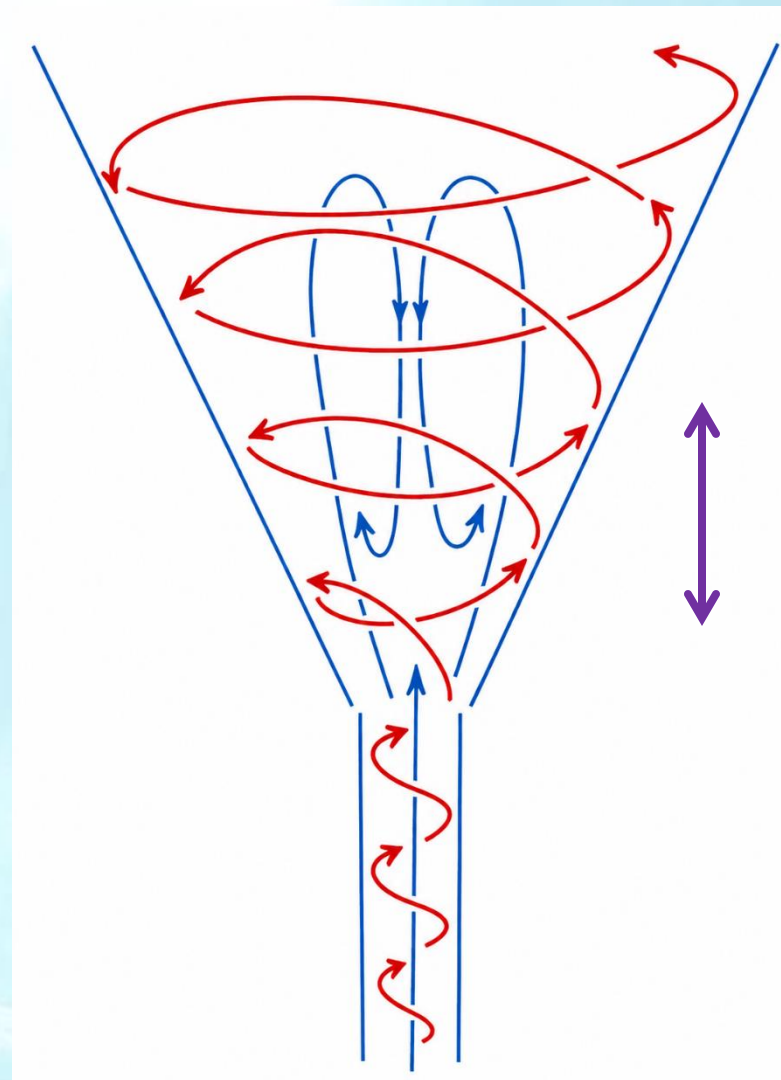
სტაციონალური ჭავლის მოდელი:
გრიგალური/მბრუნავი სტრუქტურები

ელ.მაგ. ველის ლორენც ტრანსფორმაცია
კოორდინატის ტრანსფორმაცია

$$F^{\mu\nu}(x^\delta) = \Lambda^\mu_\alpha(-\beta)\Lambda^\nu_\beta(-\beta)F'^{\alpha\beta}(x'^\delta).$$

$$x'^\delta = \Lambda^\delta_\eta(\beta)x^\eta.$$

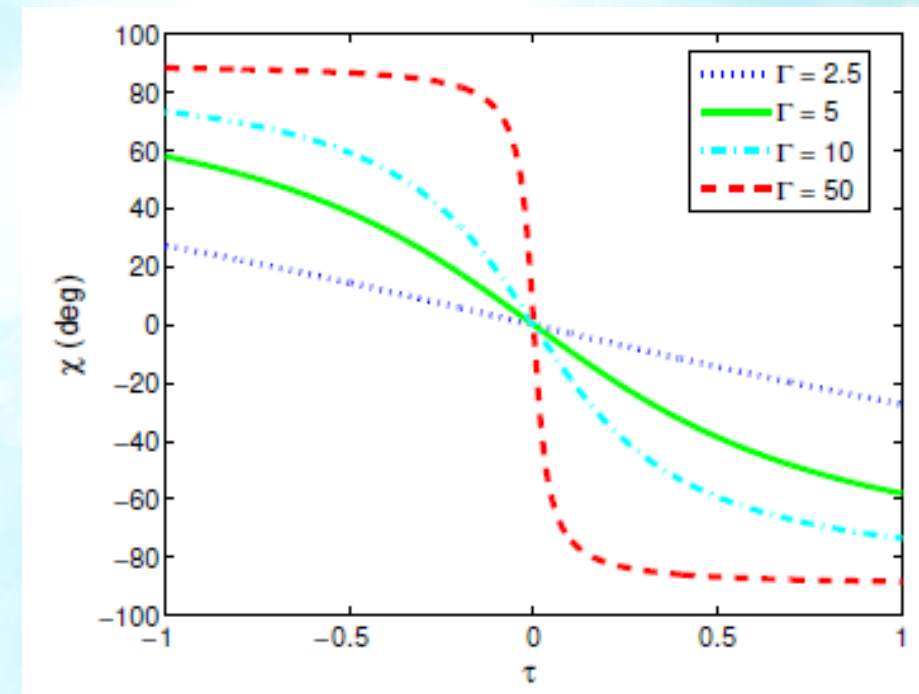
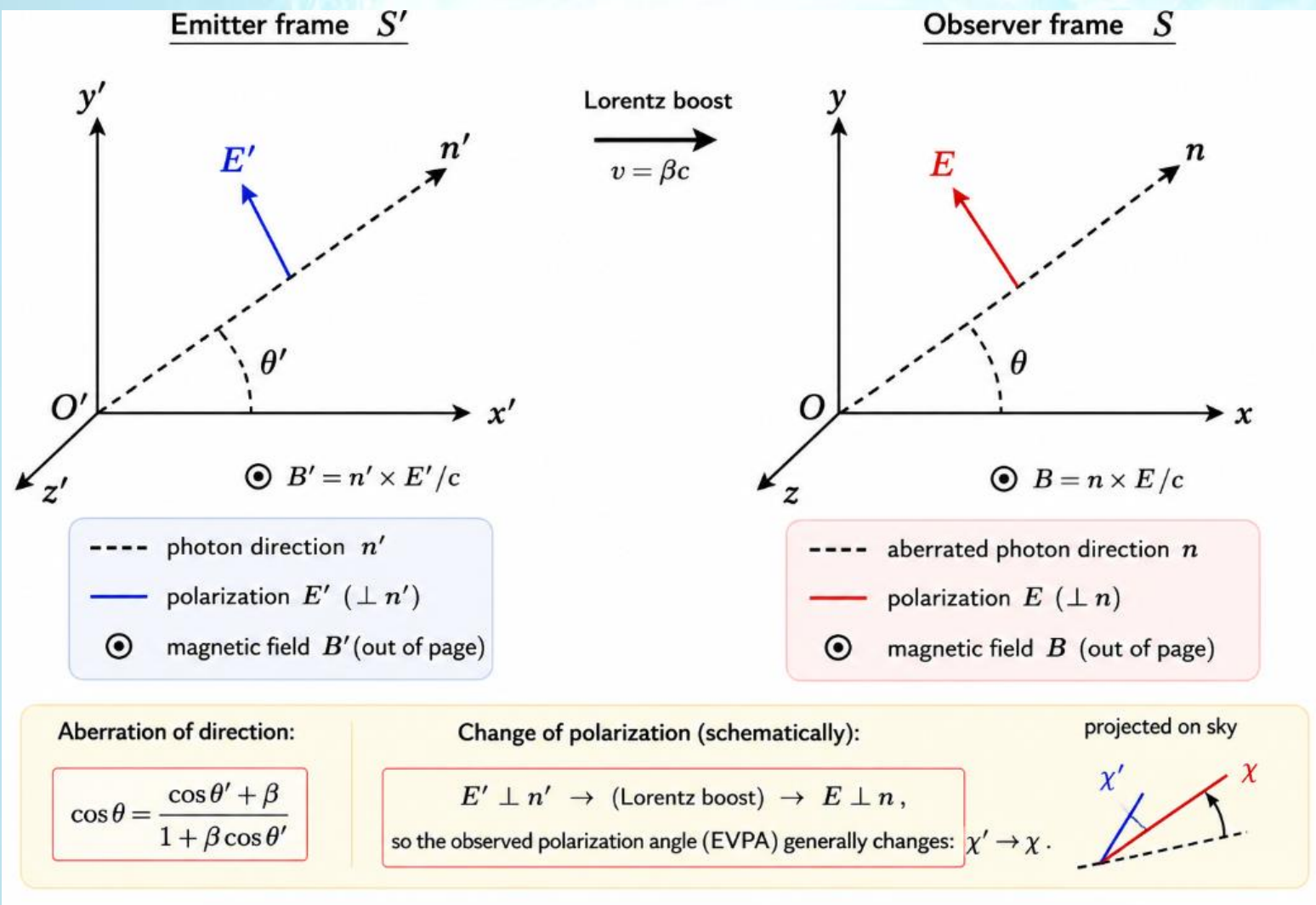
- ვერტიკალური სივრცული სტრუქტურები
- წყაროს ხილული დროითი ცვალებადობა



სტაციონალური სტრუქტურის
ხილული პულსაციები:

$$\omega_{\text{obs}} = 2\Gamma k$$

პოლარიზაციის რელატივისტური აბერაცია

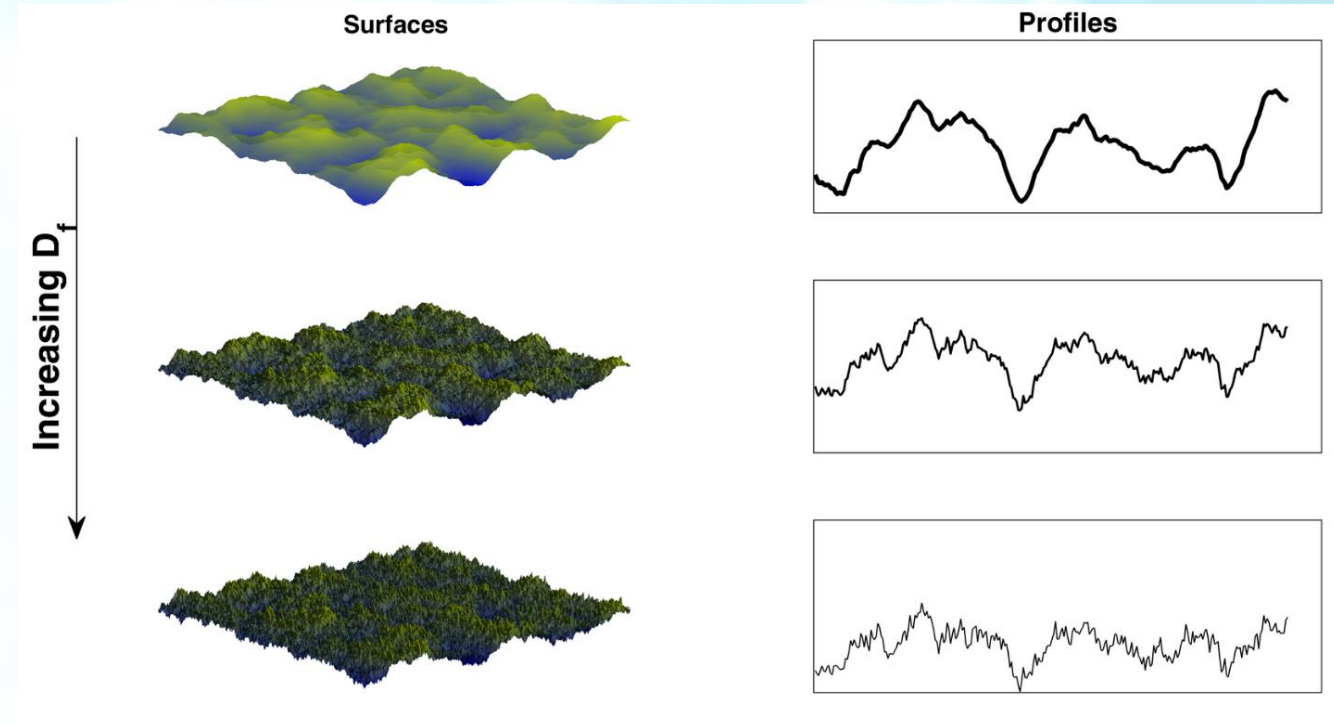
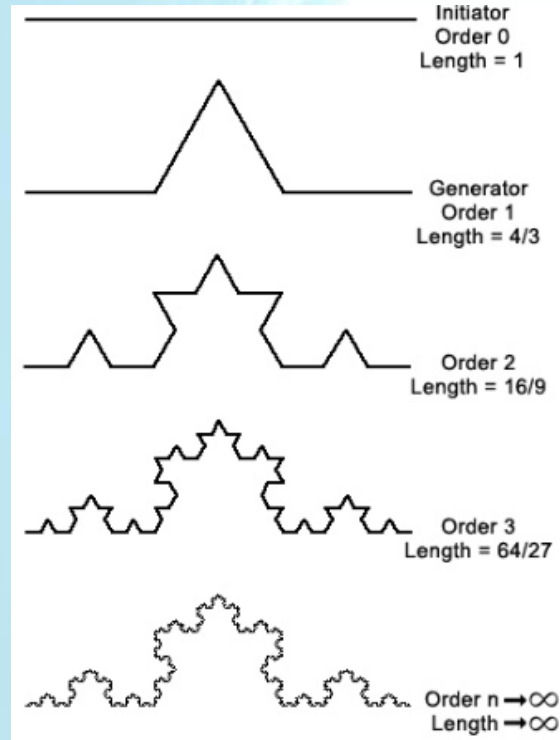


გამოსხივების წრფივი
სტაციონალური პოლარიზაციის
დროითი ლორენც ბრუნვა
(polarization swing)

Berezhiani et al. 2026

ფრაქტალური განზომილება?

ფრაქტალი: თვითმსგავსი გეომეტრიული ფორმა



განზომილება: რამდენად ავსებს ტრაექტორია/ზედაპირი/სხეული სივრცეს.



ფლუქტუაციების სპექტრის აბერაცია

გამოსხივების წყარო: ქაოსური ფლუქტუაციები (მაგ. ტურბულენტობა)

ტურბულენტობის სივრცითი სპექტრი $\rightarrow$ გამოსხივების სპექტრი

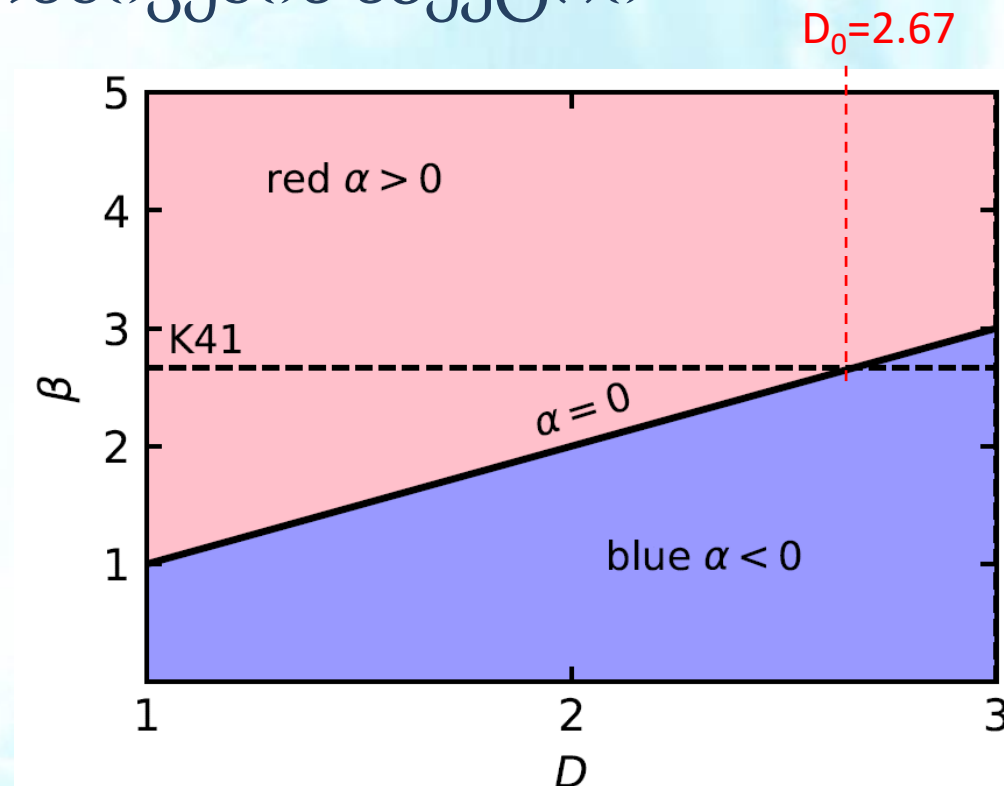
ქაოსის ეფექტური განზომილება: D

სივრცითი სპექტრული ინდექსი: β_k

აბერაციის შედეგი:

$$\alpha_k = \beta_k - D$$

*თეთრი სპექტრი წითდება ან ლურჯდება
ქაოსის განზომილების მიხედვით D*



შეკითხვები?

