



სამყაროს ევოლუცია

ლექცია 11

კლასიკური ფიზიკა და კოსმოლოგია,
ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ეფექტები,
სამყაროს გაფართოება, წითელი წანაცვლება

კოსმოლოგია

ფუნდამენტური შეკითხვები (დრო):

- არის თუ არა სამყარო სამარადისო, თუ მას გააჩნდა დასაწყისი;
- იარსებებს თუ არა სამყარო მუდმივად თუ მას გააჩნია დასასრული;
- არის თუ არა სამყარო სტატიკური და უცვლელი თუ ის დროში ცვალებადია;
- იცვლება სამყარო ერთი მიმართულებით თუ ციკლურად;

წინა ლექციაში

- მანძილის გაზომვა შორეულ ობიექტებამდე
- სამყაროს დიდმასშტაბოვანი სტრუქტურა
- კოსმოლოგიური პრინციპი

კოსმოლოგია

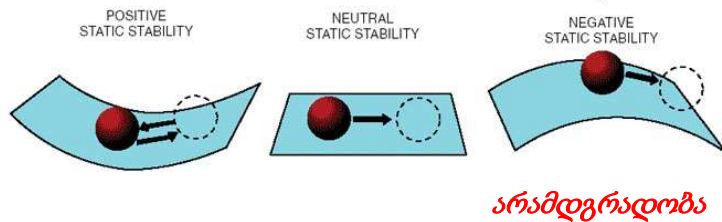
ფუნდამენტური შეკითხვები (სივრცე):

- სასრულია თუ უსასრულოა სამყარო სივრცეში;
- თუკი სამყარო სასრულია, აქვს თუ არა მას საზღვარი;

ფიზიკურ კოსმოლოგიამდე შეკითხვებზე
პასუხობდა რელიგია; (სხვადასხვა მიდგომები)

მდგრადობა

დადებითი, ნეიტრალური და უარყოფითი მდგრადობა



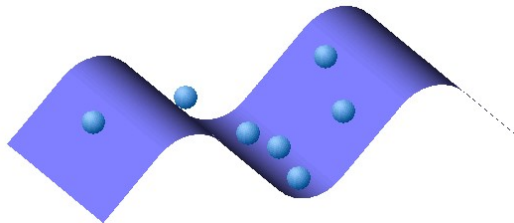
გრავიტაციული არამდგრადობა

რაც მეტი ბურთულა ჩაგორდება დრეკადი ზედაპირის ჩაღრმავებაში, მით უფრო იზრდება და ფართოვდება ღრმული;

რაც უფრო ფართოა ღრმული, მით მეტი ბურთულა იწყებს შიგნით ჩაგორებას

ანალოგია:

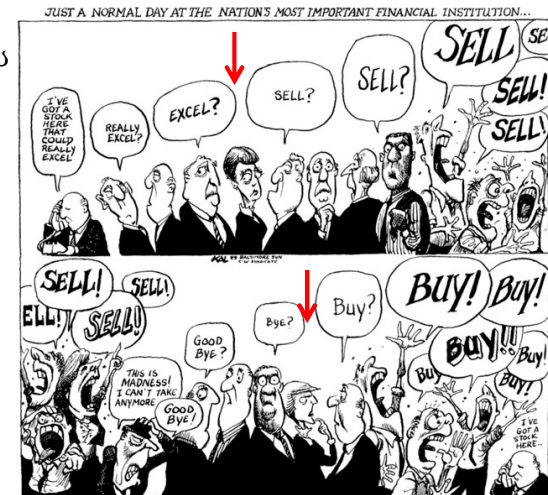
გრავიტაციული
არამდგრადობა



არამდგრადობა

არამდგრადობის
მაგალითი
რთულ
სისტემაში:
საფონდო
ბირჟა

ზეგვური
ეფექტი



კლასიკური ფიზიკა და კოსმოლოგია

დინამიკა:	ნიუტონის კანონები;
ათვლის სისტემები:	გალილეის გარდაქმნები;
გრავიტაცია:	ნიუტონის მსოფლიო მიზიდულობის კანონი;

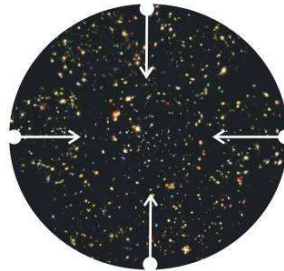
სამყარო: სტატიკური, სამარადისო; **უსასრულო**

რატომ უნდა იყოს სამყარო უსასრულო?

კლასიკური ფიზიკა და კოსმოლოგია

სასრული სამყაროს მაგალითი:

მიზიდულობა სამყაროს კიდეებში
მიმართული იქნება უპირატესად
ცენტრისაკენ



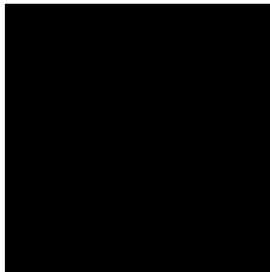
*სამყარო რომ სასრული ყოფილიყო მოხდება
გრავიტაციული კოლაფსი ცენტრისაკენ*
კლასიკური ფიზიკა წინასწარმეტყველებს
უსასრულო სამყაროს

ლამის ცა

ოლბერსის პარადოქსი (Olbers 1826)

“უსასრულო ერთგვაროვან სტატკიურ სამყაროში
ლამის ცა უნდა იყოს განათებული”

ნებისმიერი მიმართულებით
ახლო თუ შორ მანძილზე უნდა
ვხედავდეთ მნათობს.



ოლბერსის ახსნა (არასწორი):

*ბნელი ცა გამოწვეულია ვარსკვლავთშორისი აირის
და მტვრის შთანთქმით*

ნიუტონის კოსმოლოგიის პრობლემები

არ არის საჭირო სამყაროს კიდის არსებობა იმისათვის
რომ დაიწყოს გრავიტაციული არამდგრადობა:

სამყაროს ნებისმიერ წერტილში წარმოქმნილი მაღალი
სიმკვრივის არე დაიწყებდა მატერიის მიზიდვას და
მასის ზრდას - პროცესი არ დამთავრდება სანამ
მთელი სამყარო არ მოექცეოდა გრავიტაციის ცენტრში.

დაკვირვებადი სამყარო თითქმის ცარიელია
**ნიუტონის უსასრულო სამყარო გრავიტაციულად
არამდგრადია**

კლასიკური ფიზიკა და კოსმოლოგია

პრობლემები: 1. ლამის ცის პარადოქსი;
2. მდგრადობა;

აღმოჩნდა, რომ ნიუტონის უსასრულო სამყარო
გრავიტაციულად არამდგრადია უსასრულო სამყაროშიც კი:
ნებისმიერი მცირე შეშფოთება (სიმკვრივის ლოკალური
ზრდა) გამოიწვევს გრავიტაციულ არამდგრადობას და
სამყაროს კოლაფსს;

ფიზიკური კოსმოლოგია: კოსმოლოგია როგორც
მეცნიერება სათავეს იღებს თანამედროვე
გრავიტაციის თეორიის დაფუძნებიდან (აინშტაინი)

აინშტაინის თეორია

რელატივიზმი: ფარდობითობის თეორია;

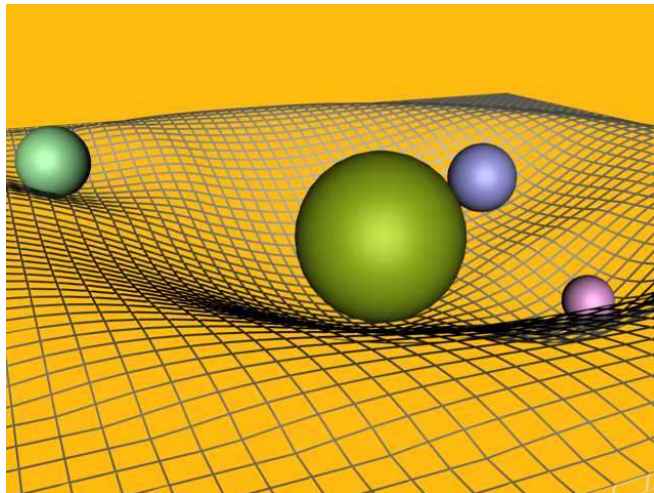
პოსტულატი:

სინათლის სიჩქარე: მაქსიმალური შესაძლო სიჩქარე;
(მასის, გამოსხივების, ინფორმაციის გადატანა)

გალილეის გარდაქმნები $\Rightarrow$ ლორენცის გადაქმნები;
სინათლის სიჩქარე მაქსიმალური სიჩქარეა ყველა
ათვლის სისტემაში;

სივრცე, აბსოლუტური დრო $\Rightarrow$ დრო–სივრცე
(ლოკალური დრო)

მასის განაწილება და სივრცის სიმრუდე



აინშტაინის თეორია

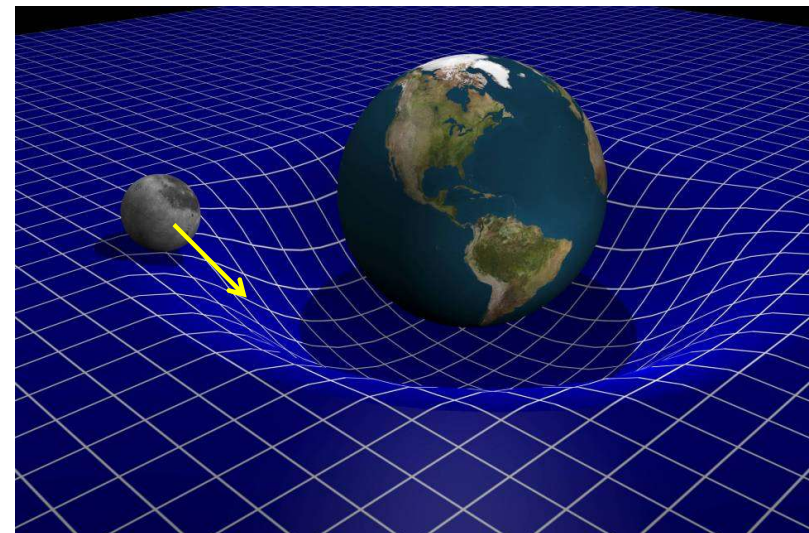
ფარდობითობის ზოგადი თეორია:

გრავიტაციის ახალი თეორია

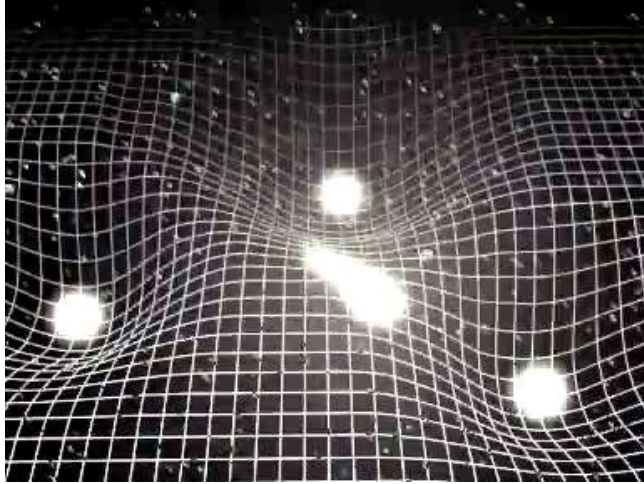
დრო–სივრცე შეიძლება იყოს გამრუდებული;
გეომეტრიული წარმოდგენები
სიმრუდე განისაზღვრება მასის განაწილებით;

იტერპრეტაცია:

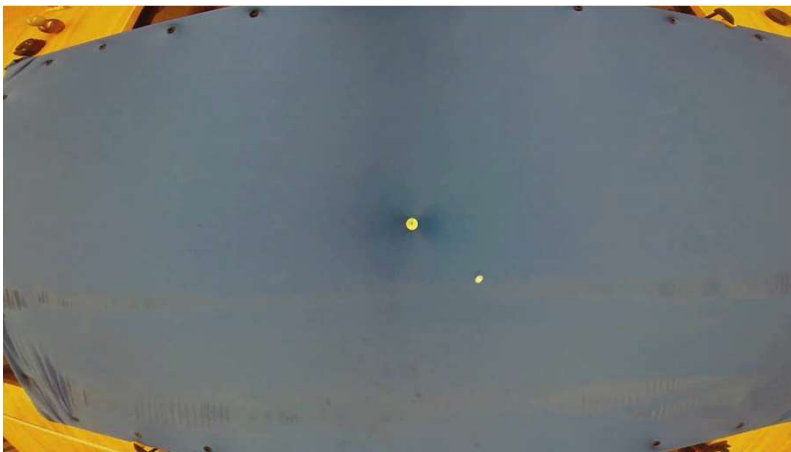
- მასა განსაზღვრავს სივრცის სიმრუდეს;
- სივრცე განსაზღვრავს მასის მოძრაობას;



სივრცის ლოკალური სიმრუდე



გრავიტაციის ვიზუალიზაცია



გრავიტაციის ვიზუალიზაცია

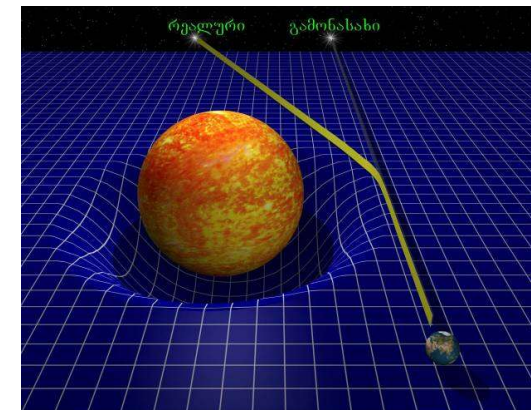


სინათლის სხივის გამრუდება

მასა/ენერგია: $E = mc^2$

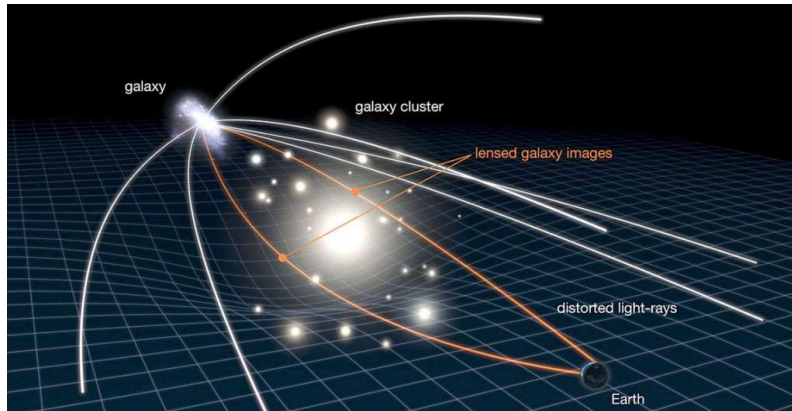
სინათლის სხივი:
ფოტონი
(ეფექტური მასა)

ფოტონის
გრავიტაციული
მიზიდვა



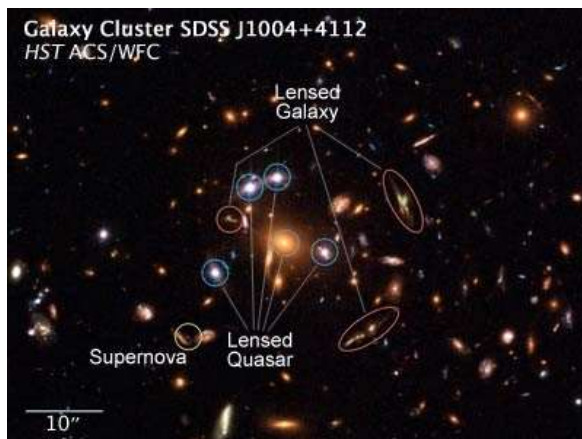
გრავიტაციული ლინზირება

შორეული ობიექტის ოპტიკური გამოსახულების
გრავიტაციული მოდიფიკაცია: ლინზირება



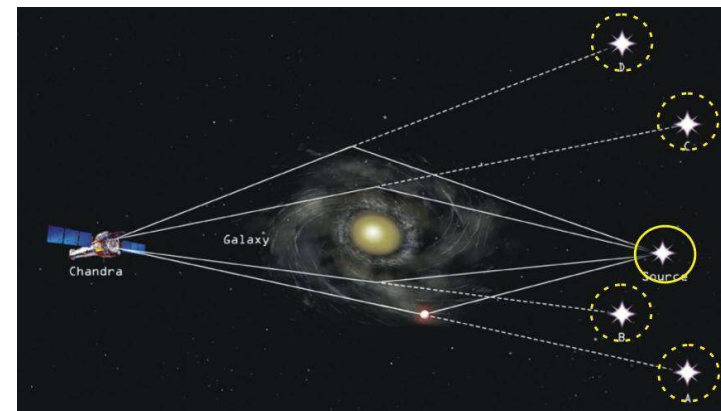
გრავიტაციული ლინზირება

შედეგი: ერთი ობიექტის მრავალჯერადი გამოსახულება



გრავიტაციული ლინზირება

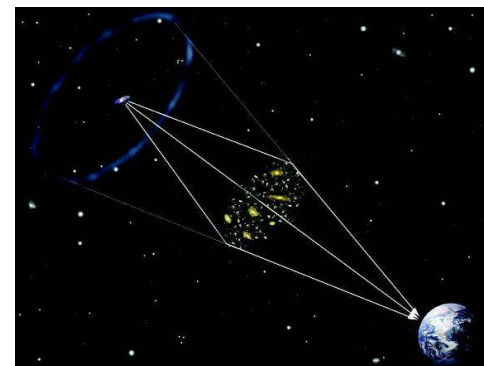
ლინზირებას შეუძლია გააჩინოს ობიექტების
წარმოსახვითი გამოსახულებები



გრავიტაციული ლინზირება

რკალური გამონასახი

თეორია



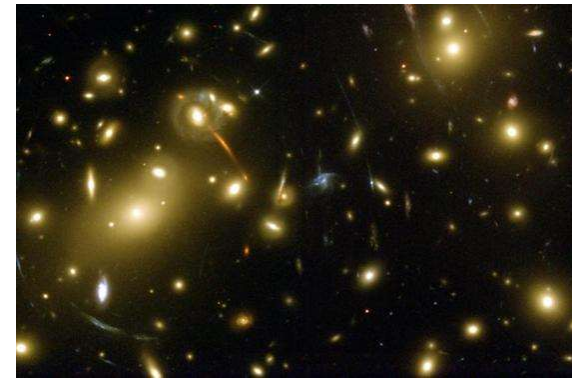
დაკვირვება

გრავიტაციული ლინზირების მოდელირება



შორეული კოსმოსი

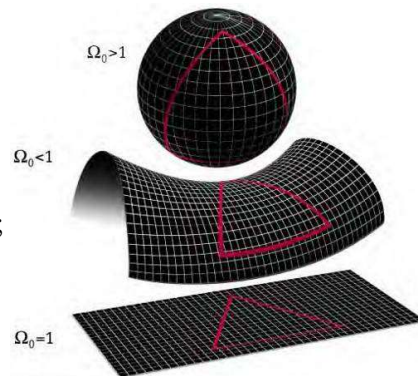
გრავიტაციული ლინზირება უპირატესად დაიკვირვება შორეული ობიექტებისათვის (საჭიროა ორი ობიექტი დაკვირვების სხივის გასწვრივ)



სამყაროს დიდმასშტაბოვანი გეომეტრია

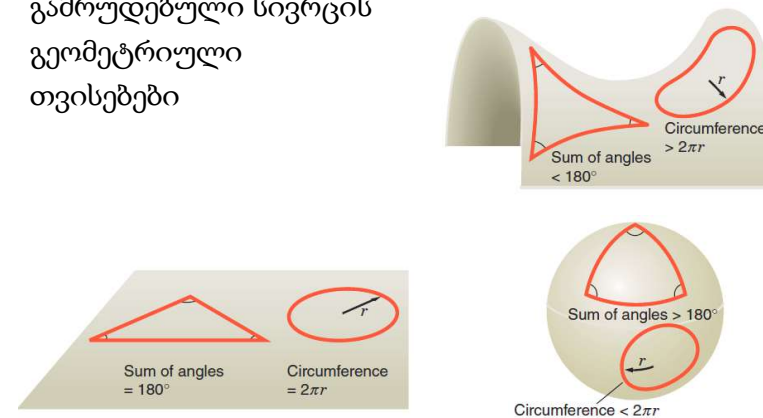
სამყაროს გლობალური გეომეტრია:
სიმრუდე:

1. დადებითი;
2. უარყოფითი;
3. ნულოვანი (ბრტყელი);



სამყაროს დიდმასშტაბოვანი გეომეტრია

გამრუდებული სივრცის
გეომეტრიული
თვისებები



აინშტაინის კოსმოლოგია

აინშტაინის განტოლება: $G \sim T$

G - მეტრიკა (სივრცის გეომეტრია – სიმრუდე)

T – ენერგია–იმპულსი (მასა, ენერგია)

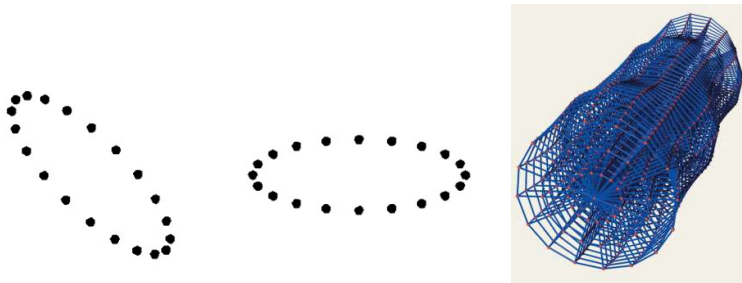
$T > 0$: გრავიტაცია მხოლოდ მიმზიდველი ძალაა

$G > 0$: **სივრცის დადებითი სიმრუდე ?**

დადებითი სიმრუდის შემთხვევაში სტატიკური სამყარო განიცდის გრავიტაციული კოლაფსს

გრავიტაციული ტალღები

დრო-სივრცის გეომეტრიის ტალღები ($G=0$).



სივრცის სიმრუდის ტალღები შეიძლება გავრცელდნენ „ცარიელ“ დრო-სივრცეშიც.

აინშტაინის კოსმოლოგია

აინშტაინის ჰიპოთეზა: მდგრადი სამყაროს არსებობისათვის საჭიროა ნულოვანი სიმრუდე დიდ მასშტაბებზე (ბრტყელი სამყარო);

$$G \sim T - \Lambda$$

Λ - აინშტაინის ლამბდა წევრი: სივრცის განზიდვა;

აინშტაინის მოდელი: სტატიკური სამყაროსათვის საჭიროა განზიდვა ძალა – ლამბდა წევრი

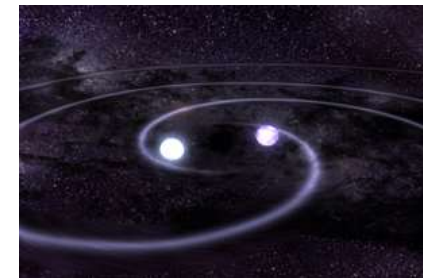
გრავიტაციული ტალღები

პირველი არაპირდაპირი დაკვირვება:

ორგამი პულსარების სისტემაში ენერგიის კარგვა გამოსხივებული გრავიტაციული ტალღების საშუალებით.

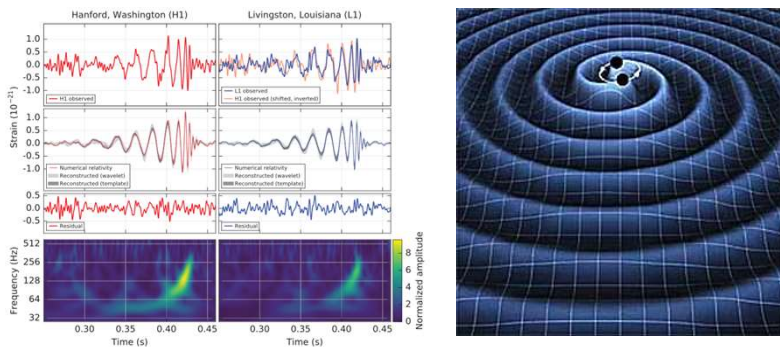
დაკვირვება:

ორმაგი სისტემის
ბრუნვის
პერიოდის
მიღება;



გრავიტაციული ტალღები

პირველი პირდაპირი დაკვირვება (Ligo 2015).
ორი შავი ხვრელის დაჯახების მიერ გამოსხივებული
იმპულსი



სამყაროს გაფართოება

ჰაბლის კანონი: გალაქტიკები გვშორდებიან მანძილის
პროპორციული სიჩქარეებით

$$V = H d$$

V - დაშორების სიჩქარე

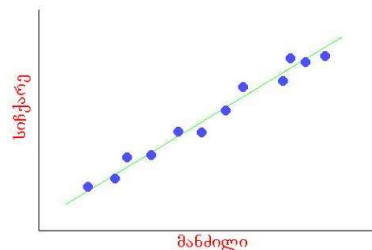
d – მანძილი გალაქტიკამდე

H – ჰაბლის მუდმივა:

$$H \approx 72 \text{ (კმ/წ) / (მეგა პარსეკი)}$$

სტატისტიკური სამყაროს

მოდელი უარყოფილია დაკვირვებებით



სამყაროს გაფართოება

დაკვირვებები:

ედვინ ჰაბლი (Hubble 1929)

გალაქტიკის წითელი წანაცვლება პროპორციულია
დედამიწამდე მანძილის

გამოსხივების სპექტრის წითელი წანაცვლება
მიგვითითებს იმ ფაქტზე რომ გალაქტიკა ჩვენ
გვშორდება (დოპლერის ეფექტი)

დაშორების სიჩქარე იზრდება შორეული
ობიექტებისათვის

სამყაროს გაფართოება

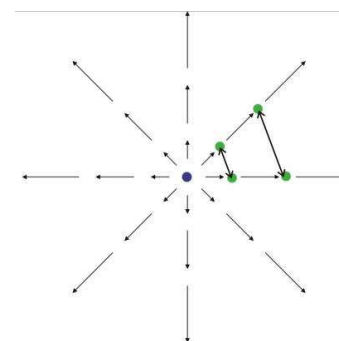
გაფართოება: არასტატისტიკური სამყარო (!)

გაფართოების ცენტრი:

დედამიწა?

კოსმოლოგიური პრინციპი:

სამყარო ერთგვაროვანია;

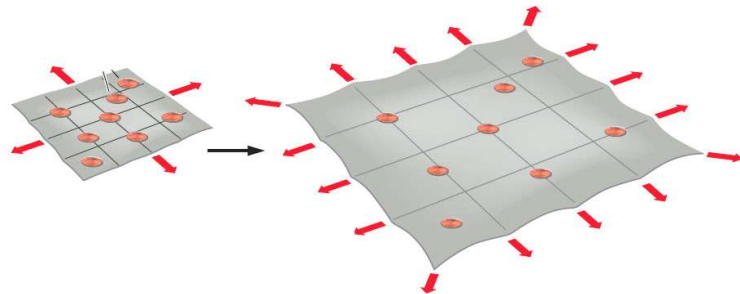


სამყარო ფართოვდება ყველგან:

ნებისმიერი ორი წერტილი შორდება ერთმანეთს

სამყაროს გაფართოება

ყოველ წერტილში გაფართოებადი ზედაპირის მოდელი



წითელი წანაცვლება

გალაქტიკების გამოსხივების ტალღის სიგრძე მატულობს მათი ჩვენგან დაშორების გამო (წითელი წანაცვლება)

Z წითელი წანაცვლება პროპორციულია დაშორების სიჩქარის

დაბალი სიჩქარეები ($v \ll c$): $z \sim v/c$

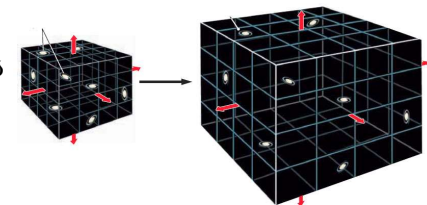
რელატივისტური ფორმა ($v \sim c$): $1 + z = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

სამყაროს გაფართოება

ჰაბლის კანონი აღწერს გალაქტიკების დაშორების სიჩქარეს და არა გალაქტიკების სიჩქარეებს სივრცეში!

მცირე სიჩქარით მოძრავი გალაქტიკა გვშორდება სივრცის გაფართოების გამო.

ჰაბლის კანონი აღწერს სივრცის გაფართოების კანონს.



წითელი წანაცვლება

სამყაროს გაფართოება საშუალებას იძლევა მანძილი გავზომოთ წითელი წანაცვლებით:

ჰაბლი: მანძილი პროპორციულია სიჩქარის

დოპლერი: სიჩქარე განსაზღვრავს წითელ წანაცვლებას

$$v = H d, \quad z = v/c$$

$$d = z c / H$$

რელატივისტური ფორმა:

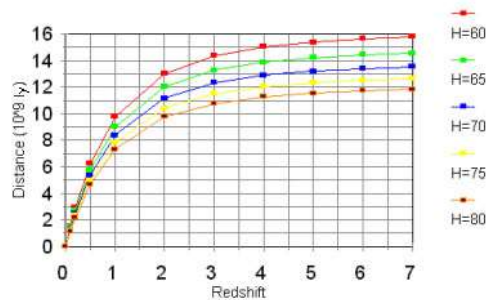
$$d = cz \frac{1 + z/2}{H_0(1 + z)^2}$$

Z მანძილის სკალა

მანძილი/წითელი წანაცვლების სკალა
დამოკიდებულია ჰაბლის მუდმივის ზუსტ
მნიშვნელობაზე:

შორეული ობიექტი:
მაღალი Z
ობიექტები
($z > 0.1$)

მაგ. კვაზარები,
ზეახალი ვარსკვლავები



ჰაბლის რადიუსი

$$R_H = C / H$$

C - სინათლის სიჩქარე

H – ჰაბლის მუდმივა

რა ხდება ჰაბლის რადიუსის გარეთ?

სამყაროს ეს ნაწილი ჩვენთან არ არის
დაკავშირებულია მიზეზ–შედეგობრივად

ჰაბლის რადიუსი

მანძილის ზრდასთან ერთად იზრდება
გალაქტიკების ჩვენგან დაშორების სიჩქარე

იმისათვის რომ გალაქტიკა დავინახოთ, ანუ
მივიღოთ გამოსხივებული სინათლე, გალაქტიკის
დაშორების სიჩქარე არ უნდა აღემატებოდეს
სინათლის სიჩქარეს.

ჰაბლის რადიუსი: რადიუსი, სადაც გალაქტიკების
დაშორების სიჩქარე უტოლდება სინათლის სიჩქარეს

ჰაბლის რადიუსის შიგნით მყოფი გალაქტიკები
გვმორდებიან სინათლის სიჩქარეზე უფრო ნელა

კოსმოლოგიური ჰორიზონტი

სამყარო შეიძლება გავყოთ დაკვირვებად და
დაუკვირვებად ნაწილებად.

ოლბერსის პარადოქსის ახსნა:

ჩვენ შეგვიძლია დავაკვირდეთ მხოლოდ სასრულ
სფეროს: ვარსკვლავების რაოდენობა ამ სფეროში
სასრულია.

დაკვირვებადი სამყაროს ზომა განსაზღვრავს
კოსმოლოგიურ ჰორიზონტს: სამყაროს იმ ნაწილს
რომლის დაკვირვებაც შესაძლებელია დედამიწიდან

კოსმოლოგიური ჰორიზონტი

ყველაზე შორეულმა ობიექტმა რომლის დანახვას შესაძლებელია დღეს სინათლე გამოასხივოს სამყაროს დაბადებისას. დღემდე ამ სინათლემ ჩვენამდე მოგზაურობისას დაფარა მაქსიმალურად შესაძლო მანძილი:

$$R_H = C T_b$$

C - სინათლის სიჩქარე

T_b – სამყაროს ასაკი

$$H \sim 1/T_b$$

ჰაბლის მუდმივით სამყაროს ასაკის შეფასება

სამყაროს ასაკი: 13.8 მილიარდი წელი

ჰაბლის რადიუსი: 13.8 მილიარდი სინათლის წელი

სივრცე და დრო სამყაროში

ხილული სამყაროს დაკვირვება:

ჩვენამდე შორეული ობიექტიდან მოსული სინათლე მნათობმა გამოასხივოს წარსულში;

დროში განსხვავება პროპორციულია მნათობამდე მანძილის;

დიდი მანძილი = შორეული წარსული;

ღრმა კოსმოსი: ადრეული სამყარო;

დაკვირვება კოსმოლოგიური ჰორიზონტზე:

სამყაროს ფოტოგრაფია მისი დაბადებისას?

კოსმოლოგიური ჰორიზონტი

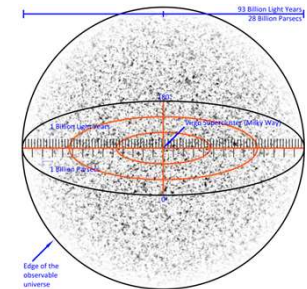
კოსმოლოგიური ჰორიზონტი: მანძილი ყველაზე დაშორებულ ობიექტამდე;

სინათლის მიერ განვლილი მანძილი (13.8 მლრ ს.წ.)

+ 13.8 მლრდ. წლის განმავლობაში განვლილი მანძილის გაფართოება;

კოსმოლოგიური ჰორიზონტი

დღეს: 46.5 მილიარდი ს.წ.



www.tevza.org/home/course/universe2019

J. Hester, B. Smith, G. Blumenthal, L. Kay, H. Voss, "21st Century Astronomy" (2010)

ქვეთავები 18.4

J. Fix "Astronomy Journey of the Cosmic Frontier", (2008)

ქვეთავები 26.1