

სამყაროს ევოლუცია

ლექცია 12

დიდი აფეთქების თეორია
ადრეული სამყარო
რელიქტური ფონური გამოსხივება

„სამყაროს ევოლუცია“ / ალ. თევზაძე / 2017

ლექცია: 12 გვერდი: 3

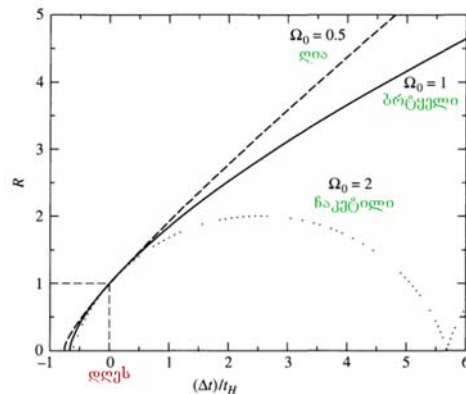
სამყაროს გაფართოება

აინშტაინის განტოლების ამონახსნი:
ფრიდმანი (1922) - სამყარო ფართოვდება;

არასტატიკური
სამყარო

სამყაროს ბედი
დამოკიდებულია
მის სიმკვრივეზე

“ღია” და
“ჩაკეტილი”
სამყარო



„სამყაროს ევოლუცია“ / ალ. თევზაძე / 2017

ლექცია: 12 გვერდი: 2

წინა ლექციაში

- კლასიკური ფიზიკა და კოსმოლოგია
- ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ეფექტები
- სამყაროს გაფართოება
- კოსმოლოგიური ჰორიზონტი

„სამყაროს ევოლუცია“ / ალ. თევზაძე / 2017

ლექცია: 12 გვერდი: 4

სამყაროს გაფართოება

ლემეტრი (Georges Lemaître , 1927)

“შექმნის მომენტში

ფეთქებადი კოსმოსური კვერცხი”

“the Cosmic Egg exploding at the moment of the creation”



“დიდი აფეთქების” (big bang) თეორიის ავტორი

სამყარო ფართოვდება საწყისი მცირე ზომის ცხელი
წერტილიდან.

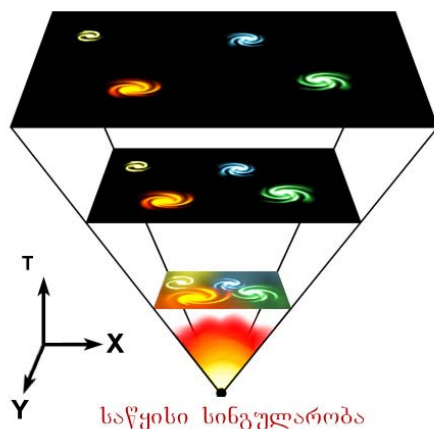
პრობლემები: საწყისი წერილი – სინგულარობა?
უსასრულო სიმკვრივე?

დიდი აფეთქება

მთელი სამყაროს
მასა თავმოყრილია
ერთ წერტილში

გაფართოებისას
იკლებს
სიმკვრივე და
ტემპერატურა

„ცხელი“ დიდი
აფეთქების მოდელი



ადრეული სამყარო

მაღალი ენერგიები, ტემპერატურა, სიმკვრივე.

დიდი გაერთიანება: გრავიტაციული,
ელექტრომაგნიტური, ბირთვული ძლიერი და
სუსტი ურთიერთქმედების აღმწერი ერთიანი
ველის თეორია.

გაფართოება: ტემპერატურის, სიმკვრივის კლება

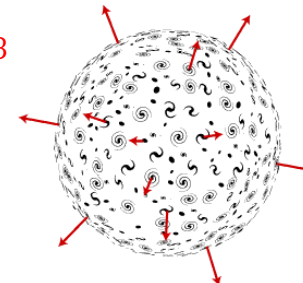
სხვადასხვა „ეპოქები“: განსხვავებული ფიზიკა

გაფართოება და კოსმოლოგიური პრინციპი

- დიდი აფეთქება: გაფართოება საწყისი წერტილიდან.
- კოსმოლოგიური პრინციპი: სამყაროში არ არსებობს გამორჩეული ადგილი ან მიმართულება;

რომელი წერტილის ირგვლივ
ფართოვდება საყარო?
პასუხი: ყველა

ანალოგი: ბუმტის
ზედაპირის გაფართოება



კოსმოლოგიური ეპოქები

10^{-32} წამი ($10^{27}K$)

ელემენტარული ნაწილაკების „ბულიონი“,
ელექტრონები, კვარკები ...

10^{-6} წამი ($10^{13}K$)

კვარკები ქმნიან პროტონებს და ნეიტრონებს

3 წუთი (10^8K)

იონიზირებული პლაზმა (გაუმჟღავნებელი)

სამყაროს ევოლუცია

380 000 წელი (10 000K)

რეკომბინაცია: იონებიდან და თავისუფალი ელექტრონებიდან ატომების წარმოქმნა და გამჭვირვალე სამყაროს დაბადება

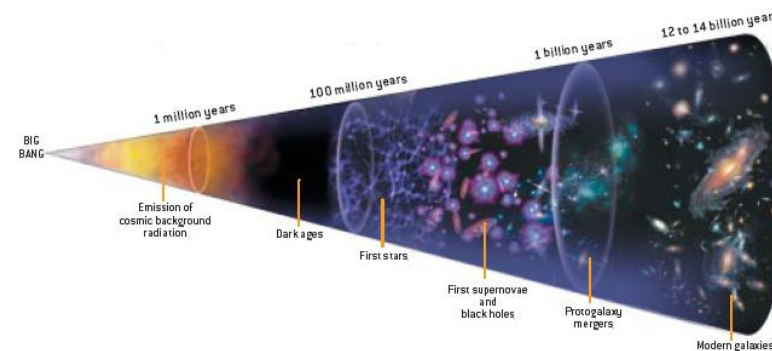
1 მილიარდი წელი (70K)

პირველი გალაქტიკების წარმოშობა

10 მილიარდი წელი (3K)

სამყაროს დღევანდელი სურათი

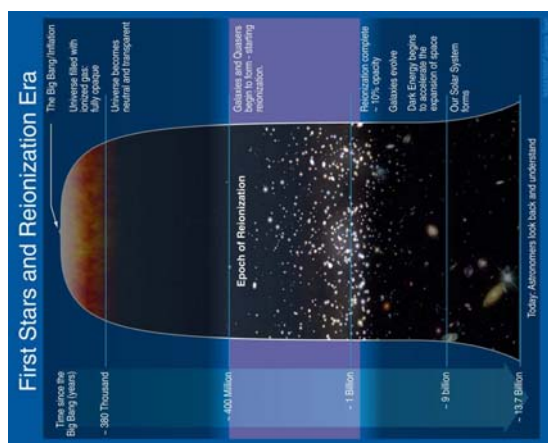
კოსმოლოგიური ეპოქები



რეიონიზაცია

ბნელი
ეპოქის
დასასრული

პირველი
ვარსკვლავების
ანთება



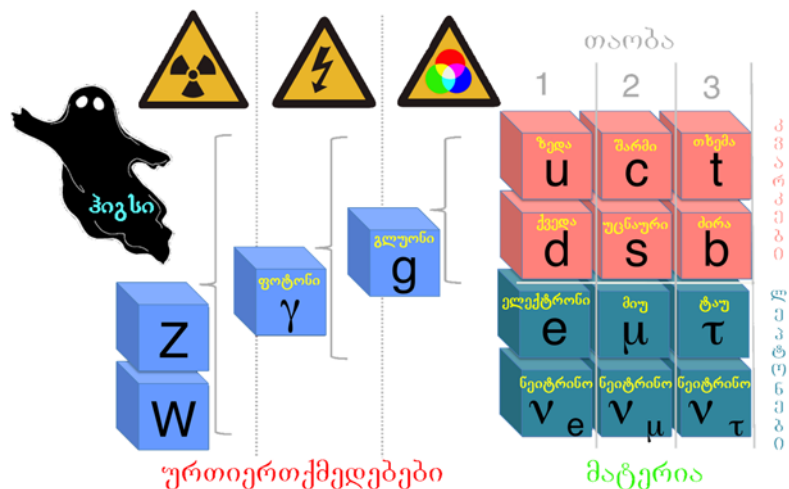
ფუნდამენტური ურთიერთქმედებები

- გრავიტაციული
- ელექტრომაგნიტური
- ძლიერი
- სუსტი

დიდი გაერთიანების თეორია: მაღალ ენერგიებზე ურთიერთქმედებები ერთიანდებიან (GUT)

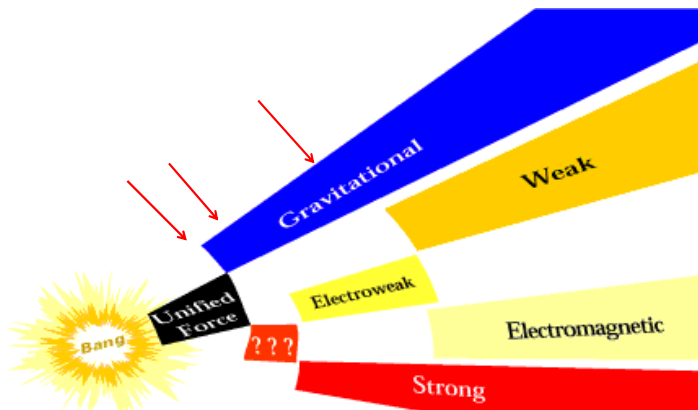
დიდი აფეთქების საწყისი ფაზა: GUT

სტანდარტული მოდელი



სამყაროს ევოლუცია

სამყაროს გაფართოება და ფუნდამენტური ურთიერთქმედებები



ნაწილაკები და ანტინაწილაკები



ადრეული ეპოქა

სამყაროს გაფართოება იწვევს ტემპერატურის კლებას

ფაზური გადასვლები:

EW: (150 GeV)

ელექტრო-სუსტი ურთიერთქმედება

QCD: (175 MeV)

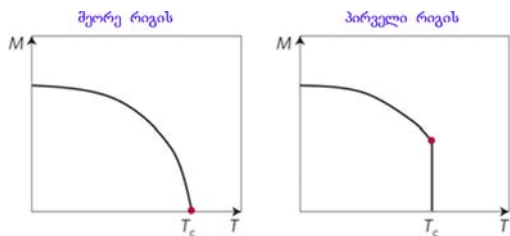
ქვანტური ქრომოდინამიკა:

ძლიერი ურთიერთქმედება

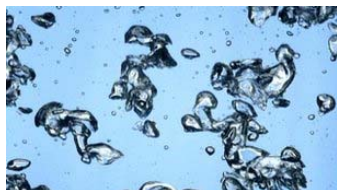
$$(1\text{MeV} = 10^6 \text{ eV} = 10^6 \times 10^3 \text{ K} = 10^9 \text{ K})$$

ფაზური გადასვლები

პირველი და მეორე რიგის ფაზური გადასვლები



პირველი რიგის ფაზური
გადასვლა:
წყლის აორთქლება



სიმეტრიები სამყაროში

სიმეტრიების დარღვევამ ფაზური გადასვლებისას
უნდა ახსნას დღევანდელი სამყაროს ხილული
ასიმეტრიები.

ბარიონული ასიმეტრია: მატერია–ანტიმატერია:
დღევანდელი სამყაროში დომინირებს მატერია;

მაგნიტური მონოპოლები: “მაგნიტური ველის მუხტი”
არ არის დამზერილი

კოსმოლოგიური ფაზური გადასვლები

ფაზური გადასვლის დროს ორი სხვადასხვა ფაზა
არსებობს ერთდროულად („ფაზის ბუმტები“)

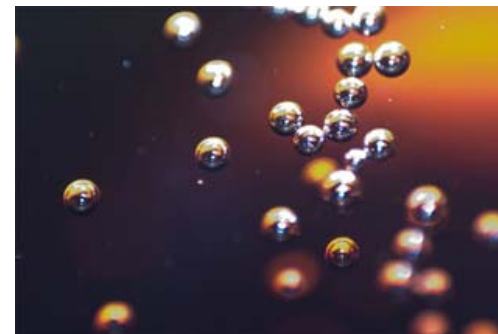
მაგალითად:

ფაზა1:

გაერთიანებული
ძალა

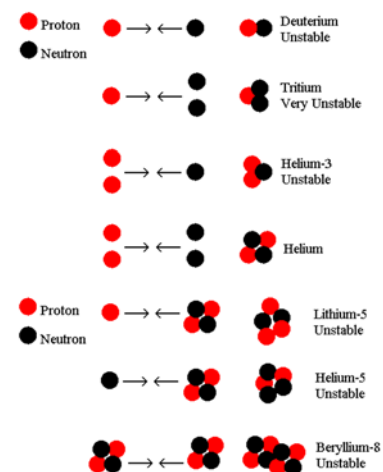
ფაზა2:

გრავიტაცია +
ქრომოდინამიკა



დიდი აფეთქების ბირთვული სინთეზი

სამყაროს
საწყისი გაცივებისას
მცირე დროის
განმავლობაში
ესწრება მხოლოს
მსუბუქი
ქიმიური
ელემენტების
სინთეზი

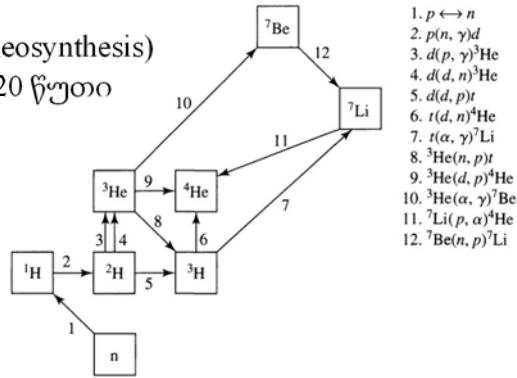


დიდი აფეთქების ბირთვული სინთეზი

BBN (Big Bang Nucleosynthesis)

სამყაროს ასაკი: 3–20 წუთი

ბირთვების
შერწყმა და
ქიმიური
ელემენტების
სინთეზი



კოსმოლოგიური წარმოშობის ქიმიური ელემენტები
(მძიმე ელემენტების სინთეზი ხდება ვარსკვლავებში)

ფონური გამოსხივება

უკანასკნელი ოპტიკური
გაფანტვის ზედაპირი:

ჩვენ ვხედავთ გაუმჭვირვალე
გარემოს ზედაპირს გამჭვირვალე
გარემოში:

მაგ: ღრუბლების ქვედა კიდე



რელიქტური გამოსხივება



თეორია (გამოვი, 1948)

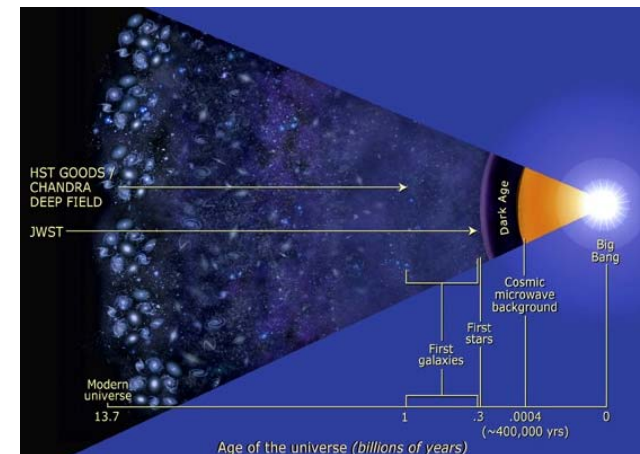
თუკი სამყარო ცივდება, მაშინ იგი გადის ე.წ.
რეკომბინაციის ეპოქას. წყალბადის იონები ქმნიან
წყალბადის ატომებს. სამყარო ხდება გამჭვირვალე.

დიდი აფეთქების ნათება უნდა ჩანდეს
გამჭვირვალე სამყაროში.

სამყარო ფართოვდება: გამოსხივების სიხშირე ეცემა
(ეფექტური ტემპერატურა). [დღეს: 3K](#)

ფონური გამოსხივება

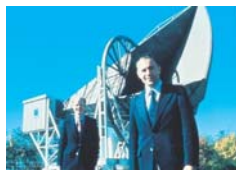
ზედაპირი, როდესაც სამყარო გახდა გამჭვირვალე



მიკროტალღოვანი გამოსხივება

მიკროტალღოვანი ფონის
გამოსხივების აღმოჩენა:

Penzias, Wilson (1965)



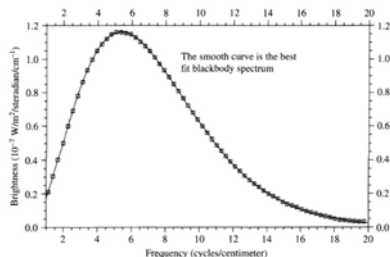
ერთგვაროვანი იზოტროპული გამოსხივება.

ტალღის სიგრძე: 1.06 მმ

მიკროტალღოვანი
გამოსხივება

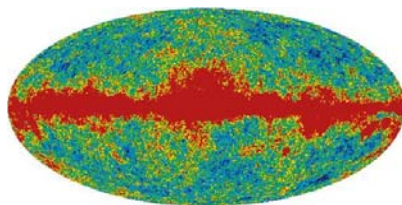
გამოსხივების ტიპი:

სითბური: 2.7K

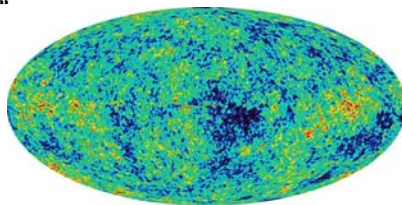


რელიქტური ფონის გამოსხივება

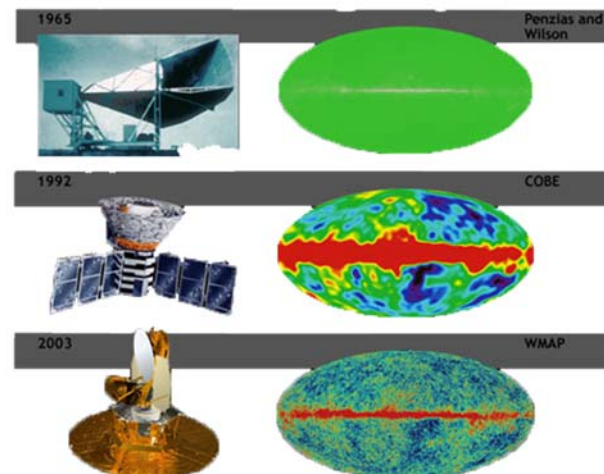
დაკვირვებული
მიკროტალღოვანი
გამოსხივება



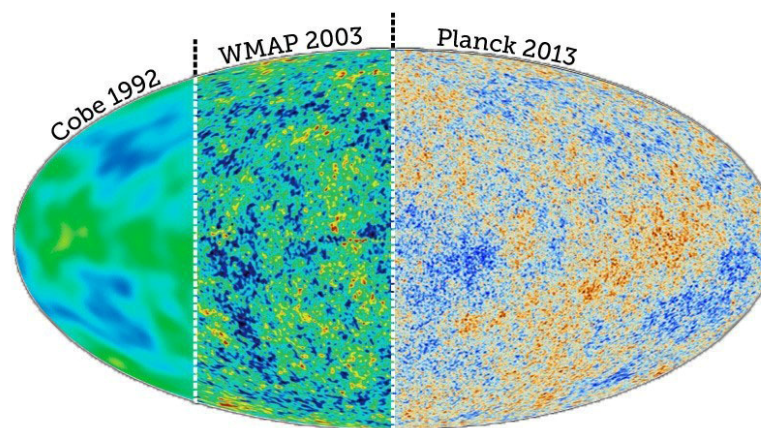
„რელიქტური გამოსხივება“
მიკროტალღოვანი
ფონი გალაქტიკური
გამოსხივების
გარეშე:



მიკროტალღოვანი ფონის გამოსხივება



რელიქტური ფონის გამოსხივება

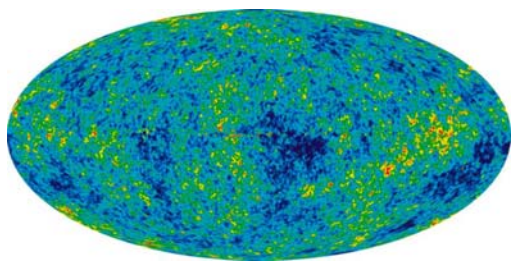


“ზუსტი” კოსმოლოგია

დაკვირვებითი კოსმოლოგიის ხანა:

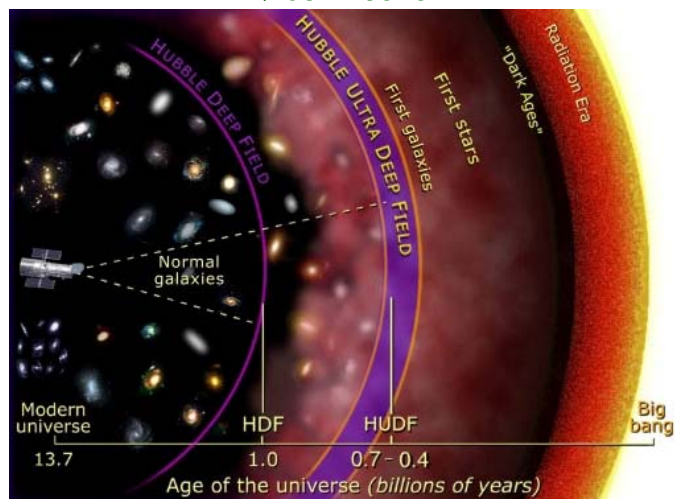
რელიქტური ფონის გამოსხივების

არაერთგვაროვნებები: ($T = 2.7K$, $\Delta T/T \sim 10^{-5}$)



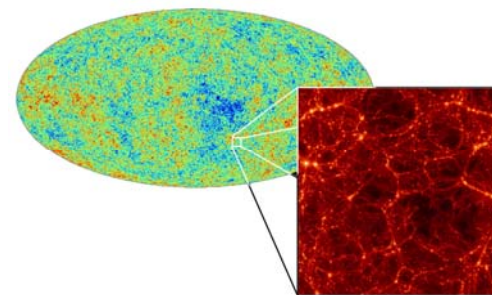
საწყისი არაერთგვაროვნებები:
გალაქტიკების ჩანასახები

დაკვირვებები

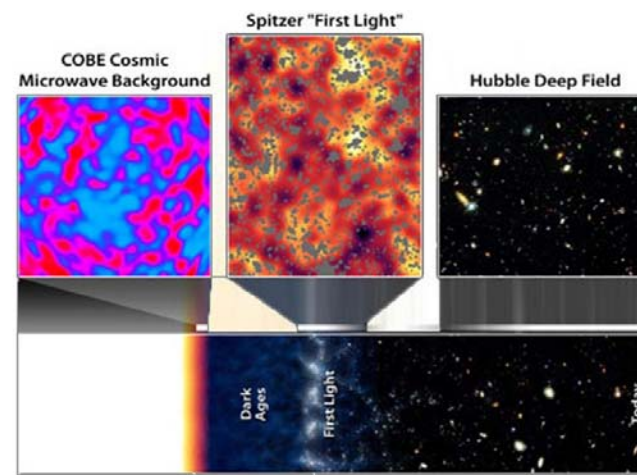


სამყაროს დიდმასშტაბოვანი სტრუქტურა

სიმკვრივის მცირე შეშფოთებები, რომლებიც ტოვებენ
ნაკვალეულს ადრეული სამყაროს გამოსხივებაში,
მოგვიანებით ქმნიან გრავიტაციული კლასტერიზაციის
ცენტრებს, რომელთა ირგვლივ გრავიტაციული
კლასტერიზაციით
წარმოიქმნებიან
გალაქტიკების
გროვები და
გალაქტიკები;



დაკვირვებები



კოსმოლოგიური დაკვირვებები

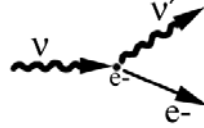
ფოტონის ელექტრონზე გაფანტვა

(კომპტონის გაფანტვა)

გამოსხივების წნევა ნივთიერებაზე:

ფოტონი ენერგიას

გადასცემს ელექტრონს;

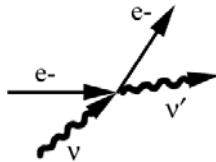


ელექტრონის ფოტონზე გაფანტვა

(შებრუნებული კომპტონის გაფანტვა)

ნივთიერების წნევა გამოსხივებაზე:

ელექტრონი ენერგიას გადასცემს ფოტონს;



კოსმოლოგიური დაკვირვებები

ლაიმან-ალფა (Ly-α) ტყე

წყალბადის ატომის

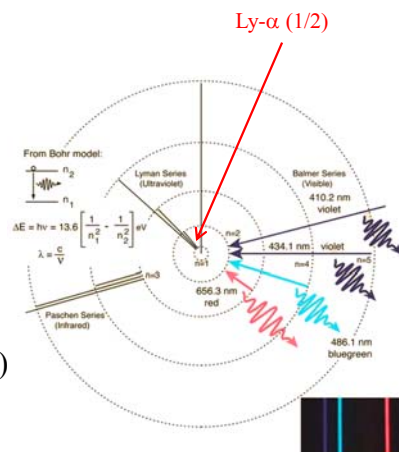
გამოსხივების/შთანთქმის

ხაზები

(გალაქტიკათშორისი

წყალბადის ატომები და

მოლეკულური ღრუბლები)



კოსმოლოგიური დაკვირვებები

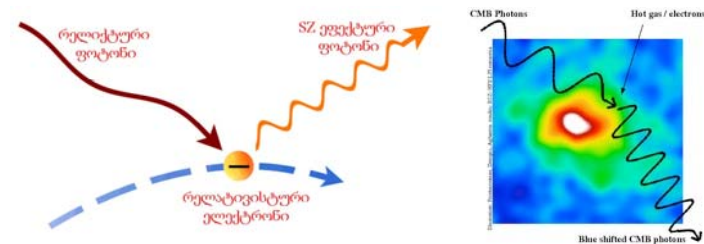
SZ ეფექტი (რ. სიუნიაევი, ი. ზელდოვიჩი)

გალაქტიკების კლასტერის რელატივისტური ფოტონები

იფანტებიან რელიქტურ ფოტონებზე და გადასცემენ

მათ ენერგიას. ამ არეგში რელიქტური ფონის გამოსხივება

განიცდის “ლურჯ წანაცვლებას”



კოსმოლოგიური დაკვირვებები

ლაიმან-ალფა (Ly-α) ტყე

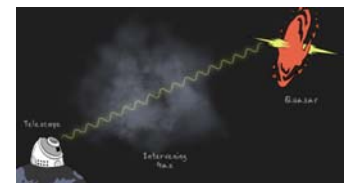
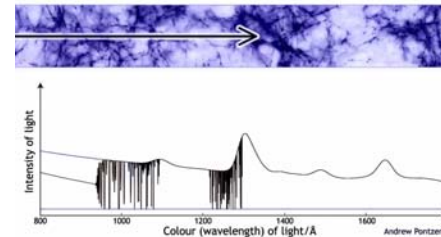
შორეული კვაზარების გამოსხივება შთანთქმდება წყალბადის მოლეკულების მიერ სხვადასხვა მანძილზე.

გამოსხივების ტალღის სიგრძე იზრდება სამყაროს

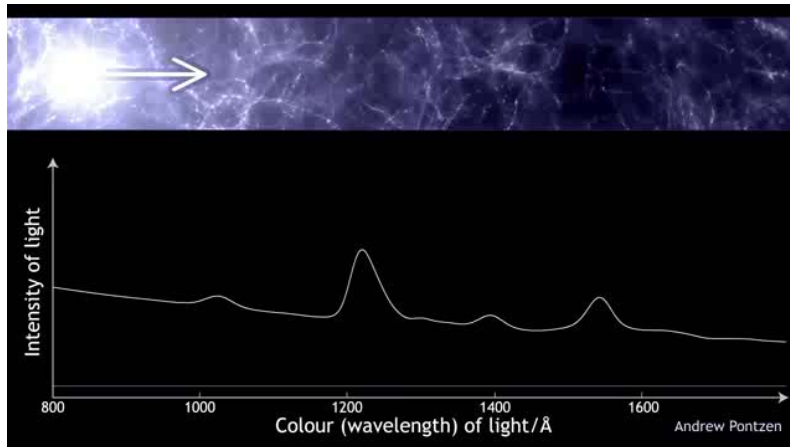
გაფართოებასთან ერთად. ლაიმან-ალფა ხაზის სიხშირე

ფიქსირებულია. ჩვენამდე მოსული კვაზარის გამოსხივება

“ჩამოჭრილია” გზაში წყალბადის შთანთქმის ეფექტით.



ლაიმან-ალფა (Ly- α) ტყე



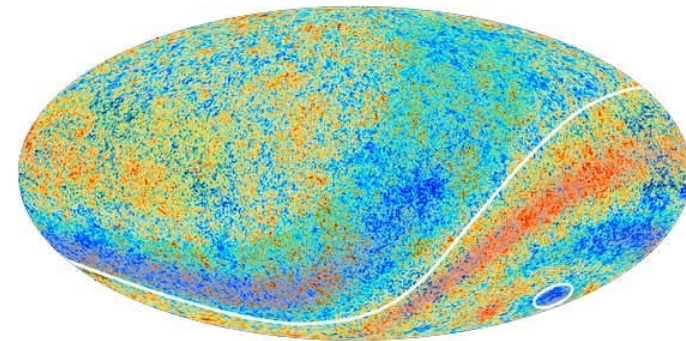
მომავალი დაკვირვებები

უკანასკნელი გაფანტვის ზედაპირი: **ოპტიკური**
 ეპოქა: წყალბადის რეკომბინაცია
 რელიქტური ფონის გამოსხივება;
 სამყაროს ასაკი: **300 000 წელი**

უკანასკნელი გაფანტვის ზედაპირი: **გრავიტაციული**
 ეპოქა: **GUT (?)**
 გრავიტაციული ფონური გამოსხივება **(?)**
 სამყაროს ასაკი **< 1 წამი (?)**

PLANK დაკვირვებები

ანომალიები რელიქტური ფონის გამოსხივებაში?



ფარული ენერგია

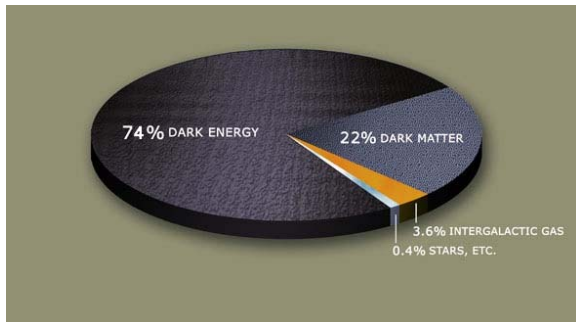
სამყაროს დიდმასშტაბოვანი გეომეტრია დიდი
 სიზუსტით ბრტყელია.

თანამედროვე დაკვირვებები, სამყაროს ასაკი

მიმზიდავი და განმზიდავი ძალების ბალანსი:
 მიმზიდავი: **ნორმალური მატერია, ფარული მასა**
 განმზიდავი: **ფარული ენერგია (ჰიპოთეტური)**

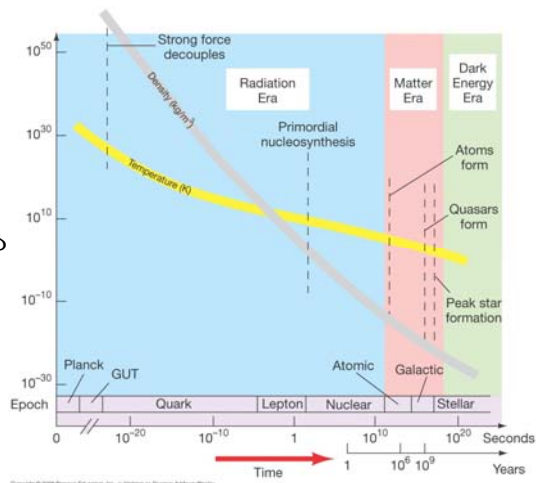
ფარული ენერგია

- 4% ვარსკვლავები, ვარსკვლავთშორისი გაზი, გამოსხივება
- 22% ფარული მასა
- 74% ფარული ენერგია ☹



კოსმოლოგიური ეტაპები

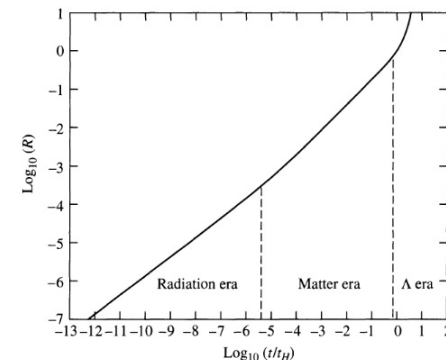
სამყაროს მომავალი “ფარული ენერგიის ეპოქა” დამოკიდებულია დღეს უცნობი ფაქტორის თვისებებზე



კოსმოლოგიური ეტაპები

სამყაროს გაფართოება იწვევს გამოსხივებისა და მატერიის სიმკვრივის კლებას, ფარული ენერგიის სიმკვრივე (ვაკუუმის თვისება) უცვლელია (ჰიპოთეზა)

1. გამოსხივების დომინირება;
2. მატერიის დომინირება;
3. ფარული ენერგიის დომინირება;



დიდი აფეთქება

სამყაროს გაფართოება საწყისი ცხელი წერტილიდან

საწყისი წერტილი: **სინგულარობა**

სამყაროს ასაკი: ~15 მილიარდი წელი

გაფართოების სიჩქარე < სინათლის სიჩქარე

სამყაროს ზომა ≤ კოსმოლოგიური ჰორიზონტი

www.tevza.org/home/course/universe2017

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

ქვეთავები 21.1