



ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებრივ მეცნიერებათა ფაკულტეტი
(სადოქტორო პროგრამა ფიზიკა)

სამეცნიერო კვლევითი პროექტი 2

ჰაბლის მუდმივას პრობლემა რეკომბინაციის ახალი კვაზი- მოლეკულური მექანიზმის ფონზე

დოქტორანტი:
რევაზ ბერაძე

ხელმძღვანელი:
ასოც. პროფ. მერაბ გოგბერაშვილი

R. Beradze and M. Gogberashvili,

“Can the quasi-molecular mechanism of recombination decrease the Hubble tension?”

Physics of the Dark Universe 32 (2021) 100841

ჰაბლის მუდმივა

სამყაროს გაფართოების მახასიათებელი სიდიდე:

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i(t) - \frac{k}{a^2}$$

$a(t)$ – მასშტაბური ფაქტორი
 $\rho_i(t)$ – ბნელი მატერიის და ენერჯიის, მატერიის და რადიაციის სიმკვრივე
 k – სიმრუდე

$$H_0 \sim 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

- სამყაროს გაფართოების გამო, ამჟამად **1 მეგაპარსეკი** მანძილით დაშორებული ობიექტები შორდებიან ერთმანეთს **~ 70 კმ/წმ** სიჩქარით.
- H_0 -ის ზუსტი ცოდნა მნიშვნელოვანია **მატერიის, ბნელი მატერიის და ბნელი ენერჯიის** სიმკვრივეების განსაზღვრისათვის.
- **ჰაბლის პარამეტრის** გაზომვა შესაძლებელია სხვადასხვა **მეთოდით** სხვადასხვა **ეპოქაში**, შემდეგ კი კონკრეტული **მოდელით** ითვლება H_0 .

ჰაბლის დაძაბულობა

- *Gaia EDR3* პარალაქსების გაზომვებით და *Hubble Space Telescope* - ის მიერ ირმის ნახტომში მდებარე 75 ცეფეიდზე დაკვირვებებით, „კოსმოსური კიბის“ უახლესი კალიბრაცია იძლევა:

$$H_0 = 73.2 \pm 1.3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

A.G. Riess, et al.,
Astrophys. J. Lett. 908
(2021) L6

- ფონური მიკროტალღური გამოსხივების (CMB) უახლესი ანალიზი და Λ CDM მოდელის გამოყენება კი იძლევა:

$$H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

Planck 2018 results.
Astron. Astrophys.
641 (2020) A6

- სახეზეა $\sim 5\%$ -იანი განსხვავება

ჰაბლის დამაბულობის გადაჭრის გზები

- გაუთვალისწინებელი სისტემატიკა
- „კოსმოსური კიბის“ არასწორი კალიბრაცია
- ბნელი სექტორის უცნობი ფიზიკა
- ნეიტრინოების ეფექტი
- აქსიონების ეფექტი
- არასტანდარტული რეკომბინაცია
-

რეკომბინაციის სტანდარტული სურათი

- პირველადი პლაზმა შედგებოდა პროტონების, ჰელიუმის იონების, ელექტრონების და ფოტონებისგან;
- $z \cong 5000 - 8000$ -ზე ჰელიუმი გახდა ერთმაგად იონიზირებული და $z \cong 1600 - 3500$ -ზე ჩამოყალიბდა ნეიტრალური ჰელიუმი;
- $z \cong 500 - 2000$ -ზე ენერგია ჩამოსცდა წყალბადის იონიზაციის ენერგიას, დაიწყო წყალბადის რეკომბინაცია და ფორმირდა CMB.
- სტანდარტული მექანიზმის მიხედვით (Peebles 1968, Zeldovich 1969), პროტონი და ელექტრონი ქმნის წყალბადის ატომს მხოლოდ აღზნებულ მდგომარეობაში.
- კასკადური გადასვლებით ელექტრონი ჩამოდის $n = 2$ დონეზე.
- ძირითად დონეზე ელექტრონი ჩამოდის $2p$ მდგომარეობიდან Lyman- α ფოტონის გამოსხივებით ან $2s$ მდგომარეობიდან 2 ფოტონის გამოსხივებით.
- თუმცა, რეკომბინაციის რეალური სურათისათვის საჭიროა შესწორების წევრების გათვალისწინება.

მგრძნობიარე პარამეტრები

- ჰაბლის მუდმივა დამოკიდებულია რეკომბინაციის დროს ბგერითი ჰორიზონტის სიდიდეზე r_* . კუთხური გბერითი რადიუსი დიდი სიზუსტით ითვლება CMB-დან და მოიცემა როგორც:

$$\theta = \frac{r_*}{d_A(z_*)}$$

$d_A(z_*)$ კუთხური მანძილია უკანასკნელი გაფანტვის ზედაპირამდე.

- $d_A(z_*)$ -ის 1% ცვლილება იწვევს H_0 -ის გაზრდას 5%-ით. C. Clarkson (2014)

მგრძნობიარე პარამეტრები

- ჰაბლის მუდმივა დამოკიდებულია რეკომბინაციის დროს ბგერითი ჰორიზონტის სიდიდეზე r_* . კუთხური გბერითი რადიუსი დიდი სიზუსტით ითვლება CMB-დან და მოიცემა როგორც:

$$\theta = \frac{r_*}{d_A(z_*)}$$

$d_A(z_*)$ კუთხური მანძილია უკანასკნელი გაფანტვის ზედაპირამდე.

- $d_A(z_*)$ -ის 1% ცვლილება იწვევს H_0 -ის გაზრდას 5%-ით. C. Clarkson (2014)

ასევე, H_0 ყველაზე მგრძნობიარეა წყალბადის იონიზაციის ენერჯის და 2-ფოტონიანი $2s \rightarrow 1s$ გადასვლების სიხშირის მიმართ:

M. Liu, et.al., *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 63 (2020) 290405

- იონიზაციის ენერჯია მაღალი რომ იყოს, რეკომბინაცია დაიწყებოდა უფრო მაღალ ტემპერატურაზე და უკანასკნელი გაბნევის ზედაპირი იქნებოდა უფრო შორს, რაც გაზრდიდა ჰაბლის კონსტანტას;
- 2-ფოტონიანი გადასვლების დაბალი სიხშირის პირობებში, რეკომბინაცია მიდის უფრო ნელა, რაც ლოკალურად ტემპერატურის ზრდის ექვივალენტურია.

კვაზი-მოლეკულური მექანიზმი (QMR)

- T. Kereselidze, I. Noselidze, J.F. Ogilvie, Mon. Not. R. Astron. Soc. 488 (2019) 2093.
 - T. Kereselidze, I. Noselidze, J.F. Ogilvie, Mon. Not. R. Astron. Soc. 501 (2021) 1160.
 - T. Kereselidze, I. Noselidze, arXiv:2104.11584.
- პრე-რეკომბინაციულ პერიოდში ($z \gtrsim 2000$), როცა პროტონების ტემპერატურა და სიმკვრივე მაღალი იყო, პროტონებს შორის საშუალო მანძილი R სადარი იყო მაღალ აღზნებულ მდგომარეობაში მყოფი წყალბადის ატომის რადიუსის $r_n = 2n^2$.
- ელექტრონს შეეძლო დაეკავშირებინა 2 პროტონი და შეექმნა $2p - 1e$ კვაზი-მოლეკულა H_2^+ .
- წყალბადის ატომის ბმის ენერგია 13.6 eV.
- H_2^+ ბმის ენერგია დიდი n -ებისთვის:

$$E \approx \left(\frac{1}{r_n} \pm \frac{3n^2}{2R^2} \right) 13.6 \text{ eV} \approx \left(1 \pm \frac{3}{16} \right) \frac{13.6}{2n^2} \text{ eV} \approx 16 \text{ eV (+ სთვის),}$$

სადაც $R \approx 2r_n \approx 4n^2$ პროტონებს შორის საშუალო მანძილია.

კვაზი-მოლეკულური მექანიზმი (QMR)

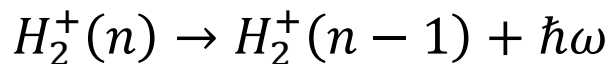
➤ ელექტრონის ბმის ენერჯის თითქმის 20%-იანი ზრდის გამო ჩნდება რადიაციული გადასვლების ახალი არხები.

➤ H_2^+ იქმნება ალგზნებულ **განმზიდავ** ან **მიმზიდავ** მდგომარეობაში.

- **განმზიდავი** დონე იშლება ალგზნებულ **წყალბადის ატომად** და **პროტონად**



- **მიმზიდავი** მდგომარეობა კასკადურად ჩამოდის ქვედა დონეებზე



და რაღაც მომენტში შეიძლება გადავიდეს **განმზიდავ** მდგომარეობაში და **დაიშალოს**.

➤ ძირითადი მდგომარეობაში მყოფი H_2^+ -ის და H -ის ფორმირების **ალბათობა** დაახლოებით **ერთნაირია**.

➤ **ელექტრონების** ალგზნებული მდგომარეობების **სიცოცხლის დრო** $10^{-9} - 10^{-7}$ წამია, რაც გაცილებით **მეტია** ვიდრე **დაჯახებების დრო**.

ჰაბლის მუდმივა QMR-ს ფონზე

- საჰას განტოლება წყალბადის რეკომბინაციისათვის:

$$\frac{x_e^2}{1-x_e} = 2.9 \times 10^{23} T^{-3/2} e^{-E/T} \quad (0 < x_e < 1),$$

$$x_e = \frac{n_e}{n_{H(tot)}} = \frac{n_e}{4.2 \times 10^5 \Omega_b h^2} T^{-3} \quad - \text{ იონიზაციური ფარდობა}$$

n_e — ელექტრონების რაოდენობის სიმკვრივე

$n_{H(tot)}$ — წყალბადის ატომების ჯამური რაოდენობის სიმკვრივე

$\Omega_b h^2 \approx 0.02$ CMB-ის ანალიზიდან

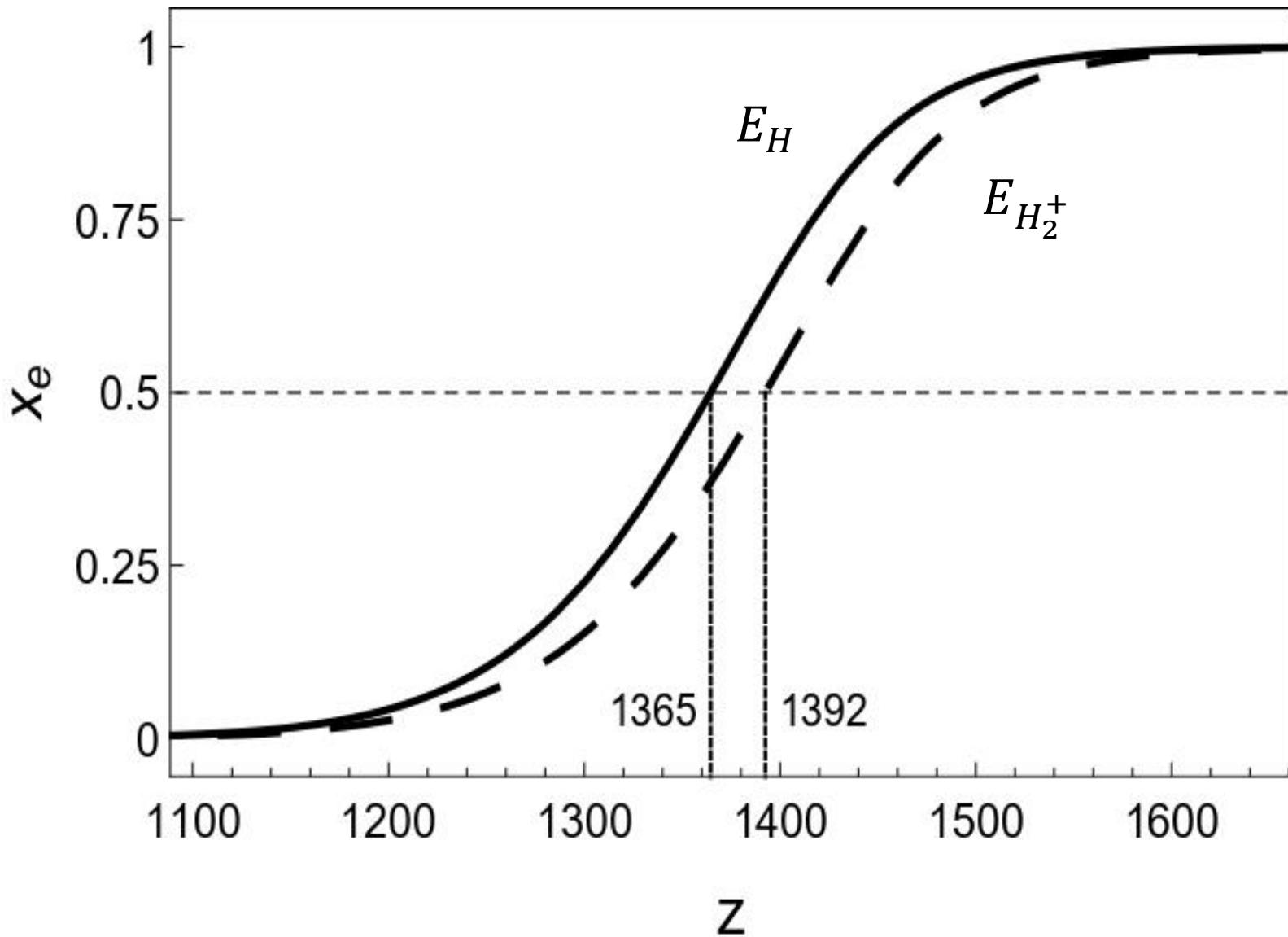
- წყალბადის იონიზაციის ენერჯის მაგივრად

$$E_H = 13.6 \text{ eV} \quad (1.58 \times 10^5 \text{ K})$$

უნდა გამოვიყენოთ H_2^+ იონიზაციის ენერჯია

$$E_{H_2^+} \approx 16 \text{ eV} \quad (1.87 \times 10^5 \text{ K})$$

ჰაბლის მუდმივა QMR-ს ფონზე



ჰაბლის მუდმივა QMR-ს ფონზე

➤ $z \approx 2000$ -ზე საჰას განტოლება მოგვცემს:

$$\frac{x_e^2}{1-x_e} \approx 50 ,$$

საიდანაც ვიპოვით, რომ

$$x_e \approx 0.98 \quad (T \sim 5000 \text{ K}) ,$$

ე.ი. პროტონების 2%-მა უკვე შექმნა წყალბადის ატომი.

➤ ეს ნიშნავს, რომ იმ დროისთვის, როცა პროტონებს შორის მანძილი იყო დიდი ($R \gg r_n$), კვაზი-მოლეკულური მექანიზმი მუშაობდა და რეკომბინაციის სტანდარტული მექანიზმის დაწყებამდე მოამზადა განსხვავებული საწყისი პირობები:

- თავისუფალი ელექტრონების რაოდენობა 2%-ით ნაკლებია სტანდარტულ სურათთან შედარებით;
- პლაზმის ფოტონების გარკვეული ნაწილი უკვე გადაიქცა ფონურ გამოსხივებად და აღარ შეჰქონდათ წვლილი წნევაში, რაც შეამცირებს ტემპერატურას.

ჰაბლის მუდმივა QMR-ს ფონზე

- ზემოთ ნათქვამიდან შეგვიძლია დავასკვნათ:
 - I. H_2^+ მდგომარეობის გამო წყალბადის რეკომბინაცია დაიწყო ადრე ($z \cong 2000 - 8000$), როცა ტემპერატურა იყო უფრო მაღალი ვიდრე სტანდარტულ სცენარშია;
 - II. წყალბადის ფორმირების ახალი არხის გამო, რეკომბინაციის პროცესი იწელება სტანდარტულ სურათთან შედარებით.
- I ექვივალენტურია წყალბადის იონიზაციის ენერჯის გაზრდის;
- II-მ შეიძლება შეასრულოს $2s \rightarrow 1s$ გადასვლების სიხშირის შემცირების როლი.
- QMR-ს მიერ გამოწვეულმა ცვლილებებმა, შესაძლოა ეფექტურად შეცვალოს ის ატომური პარამეტრები, რომლის მიმართაც ჰაბლის მუდმივა არის ყველაზე მეტად მგძნობიარე (M. Liu, et.al., *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 63 (2020) 290405).
- მნიშვნელოვანია, ხაზი გავუსვათ, რომ ეს ორი ეფექტი ადიტიურია.

დასკვნა

- ვინაიდან **თავისუფალი ელექტრონების ფარდობის** (x_e) გამოსახულებაში **ჰაბლის მუდმივა** შედის კვადრატულად და რადგან **უკანასკნელი გაბნევის ზედაპირამდე** მანძილის **1 %-იან ზრდას** შეუძლია **ჰაბლის მუდმივა** შეცვალოს **5 %-ით** (C. Clarkson 2014), შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ x_e – ს **2 %-იანმა უზუსტობამ**, რომელიც ჩნდება რეკომბინაციის **კვაზი-მოლეკულური მექანიზმის (QMR)** ფარგლებში, შეიძლება **CMB-დან** გამოთვლილი H_0 **გაზარდოს 4 – 5 %-ით** და გადაჭრას ე. წ. **ჰაბლის დაძაბულობის პრობლემა**.
- **QMR-ს** მიერ გამოწვეულმა ეფექტებმა შესაძლოა ასევე გადაწყვიტოს ე. წ. **σ_8 პრობლემაც**. **მატერიის სიმკვრივის შეშფოთების ამპლიტუდა σ_8** ითვლება **CMB-დან** და მიღებული შედეგი **2 %-ით** განსხვავდება **ლოკალური გაზომვებისგან**.
- H_0 -ის პრობლემის გადაჭრის უმეტესი მცდელობები აუარესებს **σ_8 დაძაბულობას**. თუმცა, თუ **QMR-ს** გამო რეკომბინაცია დაიწყოს უფრო ადრე, მაშინ **CMB-ს** ანალიზი შეიძლება გვაძლევდეს Ω_M -ის დიდ რიცხვს და მისმა შემცირებამ **გადაჭრას σ_8 პრობლემაც**.

გმადლობთ
ყურადღებისთვის!