

Kendala Massa Total Neutrino dari Pengamatan Baryon *Acoustic Oscillation*

Ni Putu Audita Placida Emas* dan Rendy Darma

Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganeca 10, Bandung 40132, Indonesia

* E-mail: auditasisva@gmail.com

hp: +628563822101

ABSTRAK

Neutrino merupakan fermion yang bermuatan netral dan dalam model standar diketahui tidak bermassa. Namun, melalui eksperimen osilasi neutrino, diketahui bahwa neutrino memiliki massa. Pekerjaan ini bertujuan untuk menentukan kendala massa total neutrino dari pengamatan *Baryon Acoustic Oscillation* (BAO). BAO adalah fluktuasi periodik kerapatan materi baryonik di alam semesta. Dengan menggunakan data BAO, parameter materi dapat dibatasi dengan baik sehingga kendala parameter massa total neutrino dapat ditentukan. Untuk menentukan kendala massa neutrino, digunakan statistik Bayesian melalui program CosmoMC untuk menyelesaikan permasalahan yang kompleks dari data dengan ketidakpastian yang besar. Data BAO yang digunakan adalah SDSS BAO DR12 Final consensus. Untuk menentukan parameter kosmologi yang diperoleh dari data BAO, digunakan model standar Λ CDM. Hasil yang didapatkan untuk kendala massa total neutrino adalah $< 0,388$ eV untuk interval keyakinan 95%. Jika digabungkan dengan data CMB, nilai ini menjadi $< 0,177$ eV untuk interval keyakinan yang sama.

Kata Kunci: Baryon acoustic oscillation, massa total neutrino, statistik Bayesian.

ABSTRACT

Neutrinos are neutral charged fermions which known as massless particles in the standard model. Through neutrinos oscillation experiments, we know that they are not massless now. This work aimed to constrain the total mass of neutrino from the observation of Baryon Acoustic Oscillation (BAO). BAO is a periodical fluctuation of matter density in the universe. From this data, the parameter of matter can be constrained so the constraining of the total mass of neutrino also can be determined in a good way. We use Bayesian Statistics packed in CosmoMC in order to solve the complex calculations for data with large uncertainties. The data from SDSS BAO DR12 Final consensus is used in this work. The standard model of Λ CDM is then implemented in this work to calculate the cosmological parameters obtained from BAO data. Our calculations show that the constraint of the total mass of neutrinos is < 0.388 eV for 95% C.L. and it is < 0.177 eV for 95% if we combine the BAO with CMB data.

Keywords: Baryon acoustic oscillation, total mass of neutrinos, Bayesian statistics.

1. Pendahuluan

Neutrino merupakan fermion yang bermuatan netral dan memiliki tiga spesies. Dalam model standar, neutrino diketahui tidak bermassa. Namun, berdasarkan osilasi neutrino, yang merupakan solusi dari masalah neutrino matahari, neutrino seharusnya memiliki massa. Melalui eksperimen osilasi neutrino, baik untuk neutrino Matahari dan atmosfer, kita mendapatkan perbedaan massa kuadrat neutrino (Δm_{ij}^2). Selain dari eksperimen osilasi, penentuan massa neutrino juga dapat ditentukan dari eksperimen kinematik, menghasilkan batas atas untuk masing-masing spesies neutrino.

Neutrino memainkan peranan penting dalam sejarah alam semesta. Sebagai contoh, neutrino berpengaruh pada fluktuasi temperatur *Cosmic Microwave Background* (CMB) berdasarkan sifat relativistik dan nonrelativistik neutrino. Selain itu, neutrino juga berpengaruh pada pembentukan struktur skala kecil akibat dari sifat *free-streaming* pada neutrino, untuk detail lihat [1]. Pentingnya peranan neutrino dalam sejarah alam semesta, massa neutrino dapat dibatasi dari pengamatan kosmologi. Dari analisis data pengamatan kosmologi, kita hanya mendapatkan massa total neutrino. Untuk mendapatkan massa individu neutrino, diperlukan pengamatan kosmologi yang lebih presisi. Untuk membatasi massa total neutrino, kita dapat menggunakan berbagai data kosmologi. Salah satunya dari pengamatan *Baryon Acoustic Oscillation* (BAO).

Baryon Acoustic Oscillation (BAO) adalah fluktuasi kerapatan materi baryon pada skala besar alam semesta, yaitu pada z sekitar 1020 [2]. Fluktuasi ini disebabkan oleh adanya gelombang kerapatan akustik yang berasal dari masa awal pembentukan alam semesta. Di awal pembentukan alam semesta, materi baryonik berada dalam bentuk plasma dengan temperatur yang sangat tinggi. Foton dan plasma mengalami *coupling* dalam bentuk Thomson Scattering dan menghasilkan gelombang kerapatan akustik [3–11]. Seiring mengembangnya alam semesta, ada suatu masa di mana proses Thomson Scattering tidak lagi efektif, ditandai dengan adanya *decoupling* antara foton dan plasma baryonik. Sehingga kerapatan gelombang akustik dibekukan pada masa tersebut, yaitu masa rekombinasi. Pada saat dibekukan, gaya yang mendominasi adalah gravitasi yang mulai memainkan peranannya

melalui interaksi materi baryonik dan dark matter dalam proses pembentukan galaksi dan gugus galaksi pada skala besar alam semesta. Selain itu, keberadaan BAO juga dapat dilihat dari anisotropi yang terjadi pada spektrum CMB [2, 12] dan fungsi korelasi atau *power spectrum* pada struktur skala besar [13–15].

Pengukuran BAO sangat penting dalam studi kosmologi. Melalui pengukuran BAO, kita dapat menentukan jarak diameter sudut ($D_A(z)$) dan parameter Hubble ($H(z)$) [16]. Penentuan jarak diameter sudut dipengaruhi oleh komponen pengisi alam semesta, salah satunya adalah neutrino, sehingga penentuan massa neutrino dapat ditentukan dari pengamatan BAO. Menurut [17], dengan mengkombinasikan data BAO dan berbagai data kosmologi, didapatkan kendala yang ketat untuk penentuan massa total neutrino.

Tujuan pekerjaan ini untuk menentukan kendala massa total neutrino dari data SDSS BAO DR12 Final consensus. Untuk menentukan kendala massa neutrino, digunakan analisis Bayesian yang terdapat dalam program CosmoMC yang dijelaskan pada Bagian 2. Pada Bagian 3 dipaparkan hasil dan pembahasan, serta Bagian 4 dipaparkan kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

2. Metode dan Data

Untuk menentukan kendala massa neutrino, digunakan analisis Bayesian yang terdapat pada program CosmoMC, lihat [18]. Secara matematis, statistik Bayesian dapat dituliskan seperti Persamaan (1).

$$P(\theta|d) = \frac{P(d|\theta)P(\theta)}{P(d)} \quad (1)$$

Di mana θ adalah parameter yang dicari, d adalah data, $P(d|\theta)$ adalah probabilitas *likelihood*, $P(\theta)$ adalah probabilitas *prior*, $P(d)$ adalah *evidence*, and $P(\theta|d)$ adalah probabilitas posterior.

Untuk menghitung *likelihood*, digunakan persamaan (2) dan (3).

$$\mathcal{L} \propto \exp\left(-\frac{\chi^2}{2}\right) \quad (2)$$

di mana

$$\chi^2 = (\mathbf{D} - \mathbf{T})^t \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{D} - \mathbf{T}) \quad (3)$$

Di mana \mathbf{D} adalah vektor data, \mathbf{T} adalah vektor teori, dan \mathbf{C} adalah matriks kovarian.

Untuk menghitung teori BAO digunakan persamaan (4).

$$BAO_{th} = (1+z) \frac{D_A(z)}{r_s} \quad (4)$$

Di mana $D_A(z)$ adalah jarak diameter angular dan r_s adalah horizon suara yang dapat dihitung menggunakan Persaman (7). Dalam pekerjaan ini, digunakan asumsi model kosmologi Λ CDM, sehingga perhitungan $D_A(z)$ dilakukan dengan Persamaan (5) dan (6).

$$D_A(z) = \frac{1}{H_0(1+z)} \int_0^z \frac{dz}{E(z)} \quad (5)$$

di mana

$$E(z) = \Omega_{r,0}(1+z)^4 + \Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda,0} \quad (6)$$

Jika neutrino bersifat relativistik, maka neutrino akan berkontribusi pada rapat energi radiasi. Namun, jika neutrino bersifat nonrelativistik, maka neutrino akan berkontribusi pada rapat energi materi.

$$r_s = \int_z^\infty \frac{c_s(z)}{H(z)} dz \quad (7)$$

Data yang digunakan dalam pekerjaan ini adalah SDSS BAO DR12 Final consensus. Data BAO menggunakan 3 nilai *redshift* efektif, yaitu 0,38; 0,51 dan 0,61. Data BAO yang tersedia di CosmoMC merupakan data tersier yang dapat dilihat di [19].

Prior yang digunakan dalam pekerjaan ini dapat dilihat pada Tabel I. Parameter yang dibatasi didasarkan pada parameter yang dibutuhkan untuk model Λ CDM dan yang diperhitungkan pada BAO. Parameter densitas materi (Ω_m) dapat diturunkan kemudian dengan hubungan $\Omega_m = \Omega_C + \Omega_b + \Omega_\nu$, di mana Ω_ν seperti pada Persamaan (8).

$$\Omega_\nu = \frac{\sum m_\nu}{94 h^2 \text{ eV}} \quad (8)$$

Untuk hierarki massa neutrino, digunakan hierarki massa normal berdasarkan hasil [17].

Untuk membandingkan hasil BAO, pekerjaan ini juga menyajikan hasil dengan menggunakan data CMB yang berasal dari data fluktuasi temperatur Planck 2018.

Tabel 1. *Prior* yang digunakan dalam perhitungan kendala massa total neutrino.

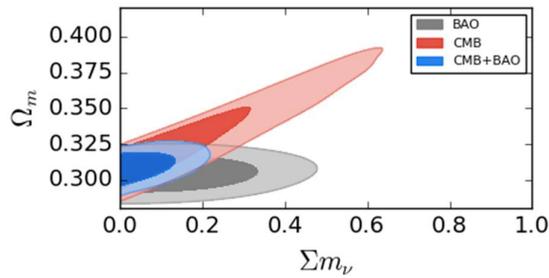
Nama Parameter	<i>prior</i>
$\Omega_c h^2$	0,1095 – 0,1219
$\Omega_b h^2$	0,022-0,0225
H_0 (km/s/Mpc)	40-100
$\sum m_\nu$ (eV)	0 – 1,5

3. Hasil dan Pembahasan

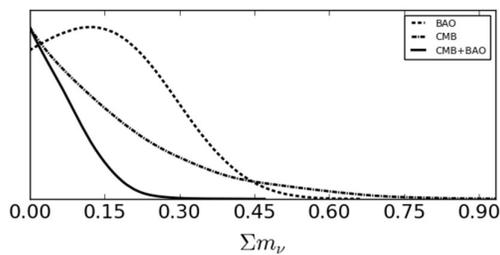
Hasil yang didapatkan dari pengolahan data menggunakan statistik Bayesian dapat dilihat pada Gambar 1, di mana untuk warna dengan gradasi yang lebih tua menunjukkan nilai dengan interval keyakinan 68% dan gradasi yang lebih muda untuk interval keyakinan 95%. Sedangkan Gambar 2 menunjukkan distribusi massa total neutrino untuk BAO, CMB, dan gabungan keduanya.

Untuk hasil yang diperoleh dari BAO, terlihat tidak memiliki kecenderungan atau hubungan antara Ω_m dengan $\sum m_\nu$ sedangkan hasil yang diperoleh dari CMB terlihat adanya hubungan antara Ω_m dengan $\sum m_\nu$. Di mana dengan bertambahnya $\sum m_\nu$ akan menambah nilai Ω_m . Hal ini disebabkan karena neutrino bermassa akan berkontribusi pada densitas materi. Berdasarkan hasil eksperimen osilasi, diperkirakan saat ini setidaknya terdapat dua neutrino yang bersifat nonrelativistik.

Hasil dari BAO dan CMB memiliki degenerasi atau kecenderungan yang berbeda. Sehingga ketika kedua data digabungkan, akan didapatkan daerah yang lebih sempit, sehingga hasil untuk kendala massa neutrino menjadi lebih ketat. Untuk tabulasi hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2 dengan hasil paling ketat ketika dua data dikombinasikan. Selain itu penentuan massa total neutrino yang lebih ketat diperoleh dari pengamatan BAO dibandingkan dengan CMB.



Gambar 1. Diagram distribusi antara Σm_ν dengan Ω_m dari BAO (abu-abu), CMB (merah) dan CMB + BAO (biru) untuk interval keyakinan 68% (warna tua) dan 95% (warna muda)



Gambar 2. Distribusi massa total neutrino yang didapatkan dari data BAO (garis putus-putus), CMB (titik-garis), dan gabungan kedua data tersebut (garis tegas), dengan sumbu y menunjukkan probabilitas.

Tabel 2. Kendala massa total neutrino yang didapatkan untuk data yang berbeda dengan interval keyakinan tertentu.

Data set	Σm_ν (eV)	
	Interval keyakinan 68%	Interval keyakinan 95%
BAO	$< 0,227$	$< 0,388$
CMB	$< 0,212$	$< 0,506$
CMB+BAO	$< 0,088$	$< 0,177$

4. Simpulan dan saran

Menentukan kendala massa total neutrino dapat diperoleh dari data BAO. Massa total neutrino diperoleh dari pengukuran jarak diameter sudut, di mana penentuan jarak dipengaruhi oleh massa total neutrino. Hasil yang didapatkan adalah $< 0,388$ eV untuk interval keyakinan 95%.

Jika analisis massa total neutrino dari BAO digabungkan dengan CMB, akan diperoleh kendala yang lebih ketat karena kedua data

memiliki degenerasi yang berbeda. Hasil yang diperoleh jika kedua data digabungkan adalah $< 0,177$ eV untuk interval keyakinan 95%.

Untuk penelitian lebih lanjut, kita dapat menggabungkan berbagai data kosmologi untuk memperoleh massa total yang lebih ketat. Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam memilih data, yaitu degenerasi data dalam menentukan massa total dan bagaimana data tersebut menentukan massa neutrino. Jika data tersebut tidak berhubungan dengan massa neutrino, data tersebut tetap dapat digunakan karena dapat membatasi parameter lain namun harus dikombinasikan dengan data CMB, struktur skala besar (LSS) dan BAO untuk mendapatkan hasil terbaik.

5. Ucapan Terima Kasih

Terima kasih yang sangat besar kami tujukan kepada Ibu Hesti Wulandari untuk diskusinya yang sangat luar biasa dan Program Studi Magister Astronomi yang telah meminjamkan fasilitas untuk mengolah data pada pekerjaan ini

6. Referensi

- [1] Lesgourgues, J. dkk. (2013). *Neutrino Cosmology*. New York: Cambridge University Press.
- [2] Slepian, Z. dkk. (2016). Detection of baryon acoustic oscillation features in the large-scale three-point correlation function of SDSS BOSS DR12 CMASS galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469: 1738.
- [3] Sakharov, A.D. (1966). The Initial Stage of an Expanding Universe and the Appearance of a Nonuniform Distribution of Matter. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 22: 241.
- [4] Peebles, P.J.E. & Yu, J.T. (1970). Primeval Adiabatic Perturbation in an Expanding Universe. *The Astrophysical Journal*, 162: 815.
- [5] Sunyaev, R.A. & Zel'dovich, Ya.B. (1970). Small-scale Fluctuations of Relic Radiation. *Astrophysics and Space Science*, 7: 3.
- [6] Bond, J.R. & Efstathiou, G. (1984). Cosmic background radiation anisotropies in universes dominated by nonbaryonic dark matter. *The Astrophysical Journal*, 285: L45.
- [7] Bond, J.R. & Efstathiou, G. (1987). The statistics of cosmic background radiation

- fluctuations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 226: 655.
- [8] Holtzmann, J.A. (1989). Microwave Background Anisotropies and Large-Scale Structure in Universes with Cold Dark Matter, Baryons, Radiation, and Massive and Massless Neutrinos. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 71: 1.
- [9] Hu, W. & Sugiyama, N. (1996). Small-Scale Cosmological Perturbations: an Analytic Approach. *The Astrophysical Journal*, 471: 542.
- [10] Eisenstein, D.J. & Hu, W. (1998). Baryonic Features in the Matter Transfer Function. *The Astrophysical Journal*, 496: 605.
- [11] Eisenstein, D.J. dkk. (2007). On the Robustness of the Acoustic Scale in the Low-redshift Clustering of Matter. *The Astrophysical Journal*, 664: 660.
- [12] Helion du Mas des Bourboux dkk. (2017). Baryon Acoustic Oscillations from the Complete SDSS-III Ly α -quasar Cross-correlation Function at $z = 2.4$. *Astronomy & Astrophysics*, 608: A130.
- [13] Addison, G.E. dkk. (2018). Elucidating Λ CDM: Impact of Baryon Acoustic Oscillation Measurements on the Hubble Constant Discrepancy. *The Astrophysical Journal*, 853: 119.
- [14] Eisenstein, D.J. dkk. (2005). Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 633: 560.
- [15] Cole, S. dkk. (2005). The 2dF Galaxy Redshift Survey: Power-spectrum Analysis of the Final Data Set and Cosmological Implications. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 362: 505.
- [16] Patej, A. & Eisenstein, D.J. (2018). Analyzing Baryon Acoustic Oscillations in Sparse Spectroscopic Samples via Cross-Correlation with Dense Photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477: 5090.
- [17] Emas, N.P.A.P. (2018). Kendala Massa Total dan Hierarki Massa Neutrino dari Pengamatan Kosmologi, Tesis Program Magister Astronomi, Institut Teknologi Bandung.
- [18] Lewis, A. dan Sarah Bridle. (2002). Cosmological parameters from CMB and other data: a Monte-Carlo approach. *Physical Review*, D66:103511. DOI: 10.1103/PhysRevD.66.103511.
- [19] Alam, S. dkk. (2017). The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: cosmological analysis of the DR12 galaxy sample. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470: 2617.
- [20] Hoeneisen, B. (2017). Constraints on Neutrino Masses from Baryon Acoustic Oscillation Measurements. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 8: 1.
- [21] Planck Collaboration, dkk. (2016). Planck intermediate results. XXIX. All-sky Dust Modelling with Planck, IRAS, and WISE Observations. *Astronomy & Astrophysics*, 594: A13.
- [22] Aubourg, É. dkk. (2015). Cosmological Implications of Baryon Acoustic Oscillation Measurements. *Physical Review D*, 92: 123516.