



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



LENSA GRAVITASI

**Perangkat Kosmologi untuk Mempelajari
Evolusi Struktur Skala Besar Semesta**

Profesor Premana Wardayanti Premadi

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
20 Juli 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

LENSA GRAVITASI

Perangkat Kosmologi untuk Mempelajari
Evolusi Struktur Skala Besar Semesta

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

LENSA GRAVITASI

Perangkat Kosmologi untuk Mempelajari Evolusi Struktur Skala Besar Semesta

Prof. Premana W. Premadi

20 Juli 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Lensa Gravitasi: Perangkat Kosmologi untuk Mempelajari Evolusi Struktur Skala Besar Semesta

Penulis : Prof. Premana W. Premadi
Reviewer : Prof. Dhani Herdiwijaya

Editor Bahasa : Rina Lestari
Cetakan I : 2024
ISBN : 978-623-297-511-8
e-ISBN : 978-623-297-512-5 (PDF)

ITB PRESS

© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Semua suku bangsa di bumi mempunyai cerita tentang semesta dan relasi manusia dengannya. Setiap individu manusia membayangkan relasi fisik maupun mental antara dirinya dengan semesta. Oleh karenanya, semenjak peradaban ada, telah terbangun narasi tentang semesta yang semakin kaya dengan semakin meningkatnya kompleksitas peradaban. Di sela-sela keanekaragaman narasi “tradisional” tentang semesta ini tampak hal yang muncul di semua narasi, dari manapun asal bangsanya, yakni bahwa semesta dalam segala aspeknya melampaui jangkauan manusia, baik dalam alam pikiran, apalagi secara fisik.

Kosmologi sebagai sains modern menangkap ini sebagai tantangan sekaligus kesempatan. Dalam sains modern, semesta dipersepsi sebagai sistem fisik maharaksasa yang dipelajari menggunakan perangkat fisika dan matematika. Kosmologi fisik adalah cabang sains yang mempelajari alam semesta fisik secara keseluruhan, yakni karakter globalnya seperti struktur geometri ruangnya, umurnya, ukurannya, isinya, serta evolusinya, dengan memperhatikan keadaan alam semesta sekarang sebagai kondisi yang harus dipenuhi oleh teori apapun yang diajukan. Kondisi alam semesta sekarang kita ketahui dari berbagai pengamatan, mulai dari yang terdekat hingga yang terjauh yang dapat teknologi indera.

Konten maupun runutan logika dan penyampaian banyak saya ikuti dari buku-buku kosmologi dari guru-guru panutan saya: Steven Weinberg dan Peter Schneider. Untuk ilustrasi pekerjaan spesifik dan pengkinian data saya manfaatkan luaran dari berbagai proyek kosmologi internasional dan berbagai hasil penelitian yang tersedia pada domain publik, termasuk penelitian yang saya terlibat langsung. Atas kemurahan hati para pemikir dan peneliti ini, saya haturkan terima kasih sebesar-besarnya. Semua kekurangan adalah tanggung jawab saya sendiri. Saya menghargai semua tanggapan yang akan memperbaiki kualitas studi dalam sektor ini, sekaligus upaya meningkatkan efikasi diseminasinya.

Saya berterima kasih kepada Prof. Dhani Herdiwijaya atas kebaikannya mereviu draf naskah buku ini, dan kepada Prof. Mindriany Syafila atas banyak nasihat terkait penulisan buku dan kesempatan orasi.

Terima kasih untuk kesempatan menulis dan berbagi. Alam semesta terlalu megah dan indah untuk dinikmati oleh astronom saja.

Lembang, 20 Juni 2024

Premana W. Premadi

SINOPSIS

Alam semesta yang kita amati sekarang menggunakan berbagai teropong di Bumi maupun di luar angkasa tampil sebagai eksistensi yang teramat besar dengan keanekaragaman isinya, dari mulai benda sekecil asteroid yang berukuran meter hingga sistem supergugus galaksi yang berukuran Mpc. Massa yang terkandung dalam volume-volume pada rentang skala yang lebar tersebut, dan kompleksitas fitur fisis yang teramati menggugah pertanyaan dari mana semua ini berasal dan bagaimana prosesnya. Pengetahuan fisika yang telah teruji pada skala kebumian, didorong untuk memeriksa kosmos yang fisiknya melampaui dimensi kebumian. Dengan fitur fisis kosmos yang besar dalam ukuran dan massanya, yang mantap untuk dipakai menelaahnya adalah Teori Relativitas Umum (TRU) Einstein. TRU dielaborasi untuk beberapa hal: (1) model kosmos yang menghasilkan gambaran dinamika dan fitur fisis globalnya, (2) model pertumbuhan gangguan dalam sistem fluida yang memberikan arahan pada deskripsi mekanisme pertumbuhan struktur, dan (3) teori lensa gravitasi sebagai *probe* distribusi massa kosmik. Pekerjaan teoretik dan komputasional ini kemudian dibandingkan dengan hasil observasi kosmik terkini untuk memberikan gambaran terbaik tentang semesta fisik kita. Pemahaman baru ini mengevaluasi dengan kritis pemahaman lama, serta melahirkan pertanyaan-pertanyaan baru yang gagasan untuk jawabannya mulai dijernihkan dan disusun. Sebagian besar mendorong untuk ditindaklanjuti dalam bentuk kerjasama riset teoretik, pengamatan, maupun komputasional.

Catatan:

Satuan panjang yang lazim dipakai dalam astronomi: parsec (pc).
 $1 \text{ pc} \approx 3,26 \text{ tahun cahaya} \approx 3,1 \times 10^{13} \text{ km}$; $\text{kpc} = 10^3 \text{ pc}$; $\text{Mpc} = 10^6 \text{ pc}$.
Satuan suhu yang lazim dipakai dalam kosmologi: Kelvin (K)
 $1 \text{ K} = -273 \text{ }^\circ\text{C}$

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR	XI
1 PENDAHULUAN KOSMOLOGI MODERN	1
1.1 Kosmologi Fisis.....	1
1.2 Luaran dan Batasan Model Kosmologi Standar	11
2 PERTUMBUHAN STRUKTUR SKALA BESAR SEMESTA	13
2.1 Pertumbuhan Gangguan Akibat Runtuh Gravitasi	15
2.2 Deskripsi Umum Distribusi Struktur Skala Besar	18
2.3 Mengenali Bibit Struktur Skala Besar	26
2.3 Peran Materi Baryon, Materi Gelap Non-Baryon, dan Energi Gelap dalam Evolusi Struktur Skala Besar.....	31
3 LENZA GRAVITASI SEBAGAI PERANGKAT KOSMOLOGI.....	35
3.1 Reviu Prinsip Dasar Pelensaan Gravitasi.....	35
3.2 Pengembangan Teknik Pelensaan Gravitasi untuk Studi Struktur Skala Besar	38
3.3 Studi Hasil Pengamatan Lensa Gravitasi	46
3.4 Studi Lanjutan: Pertanyaan-Pertanyaan Baru	49
4 PENUTUP	51
5 UCAPAN TERIMA KASIH	53
DAFTAR PUSTAKA.....	57
CURRICULUM VITAE.....	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Geometri generik semesta yang memenuhi Prinsip Kosmologi. Dari atas: bola, hiperbola, datar.	3
Gambar 2	Diagram Hubble: jarak galaksi versus <i>redshift</i> (kecepatan menjauh) menggunakan supernova Type Ia. Kemiringan garis adalah konstanta Hubble atau laju memuai alam semesta. [Sumber: Betoule et al, 2014]	6
Gambar 3	Distribusi energi foton latar belakang kosmik (Cosmic Microwave Background (CMB) Radiation yang terjaga tetap memenuhi distribusi radiasi benda hitam. [Sumber data: Fixsen et al, 1996].....	6
Gambar 4	Hasil nukleosintesa primodial yang sesuai dengan prediksi sejarah termal semesta. [Sumber: Tytler et al, 2000].....	7
Gambar 5	Semakin jauh jarak galaksi yang terlihat, semakin lampau cahaya berangkat dari galaksi itu. [Sumber: Abrams & Primack]	8
Gambar 6	Lintasan cahaya dari sumber ke pengamat berliku mengikuti distribusi potensial gravitasi struktur skala besar semesta. [Sumber: APOD]	10
Gambar 7	Skema perubahan fitur isi semesta selama memuai dari waktu ke waktu yang diskalakan dalam energi. [Sumber: LBNL].....	14
Gambar 8	Berbagai survei galaksi dan cakupannya. [Sumber: Driver & GAMA].....	18
Gambar 9	Fluktuasi densitas sebagai fungsi ukuran skala. [Sumber: Tegmark]	20
Gambar 10	Hasil simulasi kosmologis oleh Project Illustris pada skala gugus galaksi: urutan peta dari atas: distribusi densitas materi gelap, distribusi densitas gas, dan peta terbawah: dari kiri ke kanan: distribusi suhu, entropi, dan kecepatan. [Sumber: www.Illustris-project.org].....	21
Gambar 11	Hasil evolusi struktur skala besar: Panel kiri: distribusi materi gelap pada $z=0$; panel kanan distribusi galaksi	

	pada daerah berdensitas tinggi. [Sumber: Martel et al, 1998].....	24
Gambar 12	Rentang dinamik simulasi: dari 128 Mpc hingga 400 pc. [Sumber: Martel et al, 1998]	25
Gambar 13	Distribusi morfologi galaksi terhadap densitas lingkungan menyerupai relasi Dressler. [Sumber: Martel et al, 1998]	26
Gambar 14	Ilustrasi skematik evolusi dari bibit hingga struktur skala besar berupa jejaring galaksi-galaksi. [Sumber: Nature]	28
Gambar 15	Sebaran suhu CMB pada bola langit. [Sumber: WMAP]	29
Gambar 16	<i>Power spectrum</i> fluktuasi suhu CMB. [Sumber: WMAP Team]	30
Gambar 17	Ilustrasi kebergantungan power spectrum CMB pada model kosmologi. [Sumber: Tegmark]	30
Gambar 18	Fraksi kelimpahan produk nukleosintesa primordial sebagai fungsi densitas baryon: perhitungan dan hasil pengamatan. [Sumber: Tytler et al, 2000]	31
Gambar 19	Variansi massa sebagai fungsi ukuran skala berbagai jenis eksistensi struktur semesta. [Sumber: Hlozek et al, 2012].....	33
Gambar 20	Skema geometris pelensaan gravitasi dengan O (<i>Observer/Pengamat</i>), S (<i>Source/Sumber cahaya</i>), S_1 dan S_2 citra pelensaan, L (<i>Lens</i>), α sudut belok, β dan θ vektor sudut-sudut posisional, ξ <i>impact parameter</i> , D_L , D_S , dan D_{LS} jarak-jarak kosmologis antara posisi-posisi yang ditunjukkan.	36
Gambar 21	Skema pelensaan multi-bidang. Dalam pekerjaan nyata, jumlah bidang mencapai puluhan. [Sumber: Premadi et al, 1998]	40
Gambar 22	Perubahan konfigurasi titik-titik cahaya pada berkas cahaya akibat pelensaan. Kiri: pelensaan lemah, kanan pelensaan kuat. [Sumber: Premadi et al, 1998]	40
Gambar 23	Contoh distribusi penguatan cahaya akibat pelensaan dengan variasi kosmologi. [Sumber: Premadi et al, 2001]	41
Gambar 24	Distribusi probabilitas penguatan cahaya untuk supernova pada posisi $z=1$ hingga 5 dalam kosmologi	

	dengan konstanta kosmologi. [Sumber: Premadi & Martel, 2005].....	42
Gambar 25	Kiri: Dampak pelensaan gravitasi pada data modulus jarak supernova dekat untuk berbagai model kosmologi; kanan: seperti panel kiri ditambah <i>mock</i> data supernova jauh. [Sumber: Martel & Premadi, 2008]	42
Gambar 26	Citra-citra untuk kasus A-P dengan uraian peran lensa utama, lensa pendukung, dan lingkungan. [Sumber: Premadi & Martel, 2004]	44
Gambar 27	Posisi dan kekuatan lensa penghasil kasus A-P. [Sumber: Premadi & Martel, 2004]	45
Gambar 28	Distribusi densitas di sekitar lensa utama. [Sumber: Premadi & Martel, 2004]	45
Gambar 29	Contoh kasus-kasus lensa gravitasi yang ditemukan dalam survei galaksi Subaru HSC-SSP [Sumber: Jaelani et al, 2023]	47
Gambar 30	Distribusi intensitas sinar-X dari gugus galaksi CL0024 (kiri) dan RXJ0152 (kanan). [Sumber: Premadi et al 2022]	48
Gambar 31	Tampilan pada jendela optik gugus galaksi CL0024 (kiri) dan RXJ0152 (kanan). [Sumber: NASA: Hubble Space Telescope]	48
Gambar 32	Distribusi massa, termasuk massa gelap, berdasarkan analisis pelensaan gravitasi. [Sumber: Acebron et al, 2019]	49

1 PENDAHULUAN KOSMOLOGI MODERN

Semua suku bangsa di Bumi mempunyai cerita tentang semesta dan relasi manusia dengannya. Setiap individu manusia membayangkan relasi fisik maupun mental antara dirinya dengan semesta. Oleh karenanya, semenjak peradaban ada, telah terbangun narasi tentang semesta yang semakin kaya dengan semakin meningkatnya kompleksitas peradaban. Di sela-sela keanekaragaman narasi “tradisional” tentang semesta ini tampak hal yang muncul di semua narasi, dari manapun asal bangsanya, yakni bahwa semesta dalam segala aspeknya melampaui jangkauan manusia, baik dalam alam pikiran maupun imajinasi, apalagi secara fisik.

Kosmologi sebagai sains modern menangkap ini sebagai tantangan sekaligus kesempatan. Dalam sains modern, semesta dipersepsi sebagai sistem fisik maharaksasa yang dipelajari menggunakan perangkat fisika dan matematika. Kosmologi fisik adalah cabang sains yang mempelajari alam semesta fisik secara keseluruhan, yakni karakter globalnya seperti struktur geometri ruangnya, umurnya, ukurannya, isinya, serta evolusinya; dengan memperhatikan keadaan alam semesta sekarang sebagai kondisi yang harus dipenuhi oleh teori apapun yang diajukan. Kondisi alam semesta sekarang kita ketahui dari berbagai pengamatan, mulai dari yang terdekat hingga yang terjauh yang dapat teknologi indera.

Pertanyaan-pertanyaan abstrak seperti di mana batas semesta, di mana kita dalam semesta, ada apa di luar sana, sampai kapan semesta ada, dan lain sebagainya, dalam kosmologi ditanyakan ulang, tetapi lebih dikonkretkan. Kita tidak menanyakan kita di mana, tetapi berapa jarak dari sini ke galaksi-galaksi yang tampak di teleskop kita. Kita coba hitung berapa lama alam semesta telah ada dengan melihat apa yang ada dan bagaimana proses untuk menjadikan semua itu ada. Pertanyaannya lebih konservatif, tetapi realistik karena semangat sains adalah untuk mengupayakan jawaban atas pertanyaan-pertanyaan yang bermakna untuk konstruksi pengetahuan. Dengan batasan seperti inilah kosmologi modern lahir.

1.1 Kosmologi Fisis

Kosmologi fisis adalah interpretasi hasil pengamatan modern atas semesta yang menggunakan keuniversalan kaidah-kaidah fisika dan matematika,

serta mempertanyakan lebih jauh relasi kausal yang dapat menjelaskan pengamatan. Domain kerjanya dibatasi pada alam semesta fisis. Seperti halnya pekerjaan sains yang lain, pengujian atas hipotesis interpretasi dijalankan. Dalam hal kosmologi, pekerjaan ini juga dibebani tugas memeriksa batas keabsahan kaidah fisika yang dipahami dan digunakan, dan mendorong formulasi matematis yang lebih generik untuk aplikasi yang lebih luas. Agar representatif kosmologis, ruang studi mencakup volume yang amat luas, ukuran radial dalam orde Gpc, waktu proses fisis dengan spektrum lebar dari subdetik ke miliar tahun, dan rentang energi (suhu) lebar dari beberapa Kelvin hingga 10^{15} Kelvin.

1.1.1 Model Kosmologi Standar

Hal yang disepakati sebagai kosmologi standar adalah teori kosmologi yang dikembangkan dari asumsi dasar, dikenal sebagai Prinsip Kosmologi, bahwasanya sebaran isi alam semesta ini seragam dalam skala amat besar (~ 100 Mpc) yang konsekuensi geometrinya adalah alam semesta ini memiliki kurvatur yang sama di mana-mana dan memiliki simetri sferis dalam artian yang luas. Artinya, dalam skala sebesar ini fitur rata-rata alam semesta sama di mana-mana, tak ada yang terlalu istimewa. Implikasi dari prinsip ini adalah tidak ada posisi istimewa dalam semesta. Kita tidak berada pada posisi istimewa. Jika ada pengamat di galaksi lain yang jauh dari kita, ia akan melihat semesta dalam skala besar tampil dengan fitur rata-rata yang mirip dengan yang kita lihat. Oleh karena itu Prinsip Kosmologi ini juga dikenal sebagai *Principle of Mediocrity*.

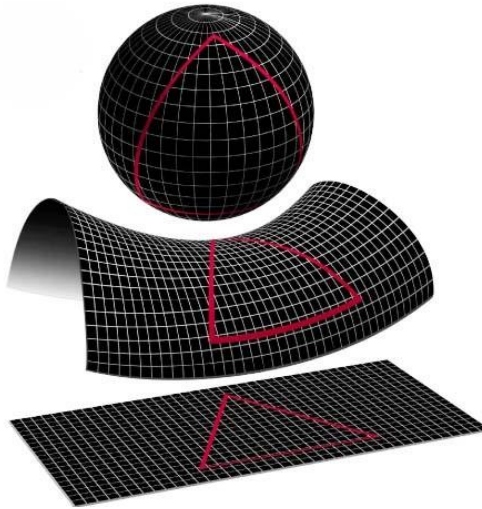
Pada skala sebesar itu, interaksi gravitasi adalah interaksi alami yang dominan karena jangkauan kerjanya yang panjang dan sifatnya yang akumulatif (Schutz, 2009). Teori gravitasi yang memadai untuk kerangka kerja ini adalah Teori Relativitas Umum Einstein, yang rumusan umumnya adalah:

$$R_{\alpha\beta} - g_{\alpha\beta}R = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\alpha\beta}, \tag{1}$$

di mana $R_{\alpha\beta}$ adalah tensor Ricci yang memberi gambaran tentang kurvatur, R skalar Ricci yang memberikan ide tentang “ukuran”, $g_{\alpha\beta}$ tensor metrik yang menunjukkan relasi antar basis-basis pengkontruksi geometri, G konstanta gravitasi Newton, c kecepatan cahaya, dan $T_{\alpha\beta}$ tensor energi-

momentum yang menjelaskan distribusi pengisi ruangwaktu yang dibicarakan. Dibaca dari kiri ke kanan, Persamaan (1) mengatakan bahwa geometri ruangwaktu menentukan bagaimana isinya tersebar dan bergerak, sedangkan dari kanan ke kiri mengatakan distribusi isi ruangwaktu menentukan geometri dan dinamika ruangwaktunya. Tentu saja gambaran komprehensif tentang dinamikanya memerlukan uraian lengkap yang diturunkan dari berbagai manifestasi kondisi kekekalan energi total yang dinyatakan dalam bentuk turunan kovarian lengkap dari semua komponen tensor energi-momentum berharga nol.

Prinsip Kosmologi yang diperkenalkan di awal mendiktekan bahwa alam semesta isotropik (seragam ke segala arah) dan homogen (seragam dalam skala panjang) memiliki geometri yang bersimetri sferis dengan kurvatur sama di mana-mana. Hal yang secara generik memenuhi permintaan ini hanyalah geometri datar, geometri bola tertutup, dan geometri hiperbolik yang kurvturnya seragam pada seluruh bagiannya.



Gambar 1 Geometri generik semesta yang memenuhi Prinsip Kosmologi. Dari atas: bola, hiperbola, datar.

Secara umum, dengan memilih koordinat bola dalam ekspresi untuk tensor metrik $g_{\alpha\beta}$, dikenal sebagai metrik Robertson-Walker, elemen jarak dapat dituliskan berturut-turut untuk geometri datar, bola (tertutup), dan hiperbola (terbuka):

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 [dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)], \quad (2)$$

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left[dr^2 + R^2 \sin^2 \left(\frac{r}{R} \right) (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right], \quad (3)$$

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left[dr^2 + R^2 \sinh^2 \left(\frac{r}{R} \right) (d\theta^2 + \sinh^2 \theta d\phi^2) \right], \quad (4)$$

dengan R radius kurvatur dan $a(t)$ adalah faktor skala yang menunjukkan ukuran semesta pada waktu t dibandingkan dengan ukurannya sekarang. Untuk memastikan kurvatur tetap sama pada keseluruhan ruangwaktu, elemen basis r , θ , dan ϕ tidak bergantung pada waktu; kebergantungan pada waktu hanya muncul pada faktor skala $a(t)$ yang memperbolehkan semesta berubah ukuran tanpa mengubah geometrinya.

Untuk menghitung jarak antara dua titik dalam ruangwaktu yang ditinjau, dipilih satu dari ketiga persamaan di atas yang geometrinya sesuai dengan ruangwaktu yang dimaksud. Masalahnya, kita tidak tahu geometri alam semesta. Justru fitur global semesta, termasuk geometrinya, yang ingin kita ketahui. Maka, sambil berjalan, akan kita lihat proses pekerjaan *inverse problem* yang khas dalam kosmologi: menggunakan data untuk membangun relasi empiris untuk memeriksa keberlakuan relasi fisis dan geometri yang ada untuk memilih yang memberikan deskripsi terbaik.

Namun demikian, metrik yang memberikan persamaan di atas dapat dimasukkan ke dalam persamaan Medan Einstein (Persamaan (1)) untuk menghasilkan persamaan yang menggambarkan dinamika alam semesta, yang dikenal dengan persamaan Friedman-Lemaître:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}, \quad (5)$$

dengan ρ kerapatan massa, K signature kurvatur ($K=0$ datar, $K=1$ tertutup, $K=-1$ terbuka), dan Λ kerapatan *dark energy* atau Konstanta Kosmologi. Persamaan ini dikenal juga dengan persamaan energi karena merupakan pernyataan kekekalan energi total. Menurunkan persamaan ini sekali lagi terhadap waktu memberikan persamaan gaya:

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a} \right)^2 = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3P}{c^2} \right) - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}, \quad (6)$$

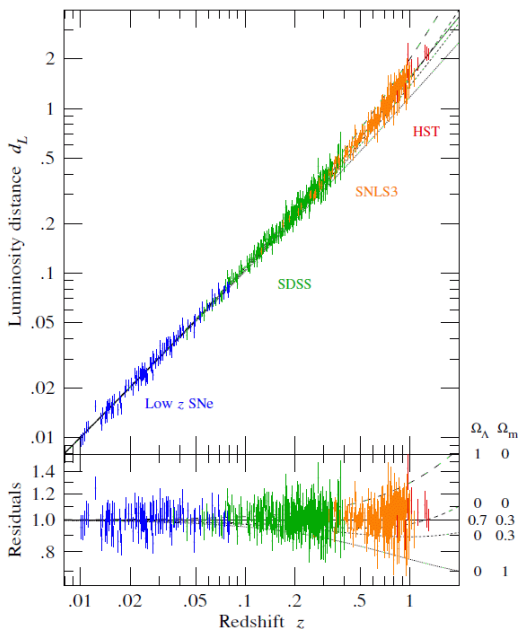
dengan P tekanan, yang juga dapat hadir sebagai sumber pada tensor energi-momentum. Relasi P dan ρ berupa persamaan keadaan yang bergantung pada jenis isi semesta yang ditinjau.

Dengan memberikan nilai pada parameter-parameter kerapatan dan persamaan keadaan, solusi kedua persamaan diferensial Friedman-Lemaître ini memberikan deskripsi lengkap tentang perubahan skala global semesta terhadap waktu. Kecuali untuk kasus sederhana yang solusinya dapat diperoleh secara analitik, kasus yang lebih realistik memerlukan metode numerik untuk perolehan $a(t)$. Untuk alam semesta berisi materi berupa partikel bermassa (baryon maupun non-baryon) dan radiasi, relasi antara densitas dan tekanan akan menghasilkan faktor skala membesar secara monotonik terhadap waktu. Selain itu, dapat kita hitung mundur dari harga faktor skala sekarang, yakni 1, ke harga minimalnya, bisa ambil 0, akan kita peroleh waktu yang diperlukan adalah berhingga. Artinya, ukuran 0 alam semesta ada pada waktu yang berhingga di masa lampau. Ini diinterpretasi sebagai alam semesta memiliki permulaan dan memuai semenjak itu.

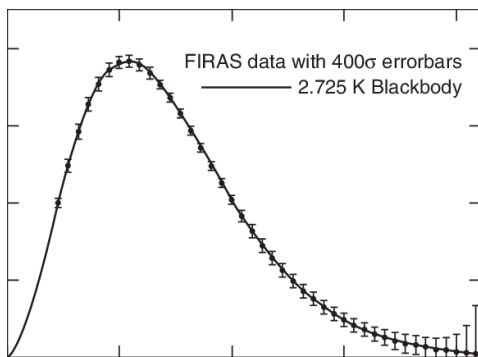
1.1.2 Alam Semesta Memuai dan Indikasi Observasionalnya

Dalam era yang sama Einstein mencetuskan Teori Relativitas-nya, Edwin Hubble dan rekan-rekannya mengamati sejumlah galaksi. Mereka dapatkan bahwa semakin jauh galaksinya semakin tinggi kecepatan galaksi menjauhi kita (pengamat). Memperhatikan Prinsip Kosmologi bahwasanya tak ada posisi istimewa, temuan tim Hubble ini diluaskan dengan menduga semua galaksi akan melihat galaksi-galaksi lain menjauhinya. Interpretasi logis yang paling sederhana adalah gerak saling menjauh galaksi-galaksi ini disebabkan oleh ruang di antara mereka membesar. Singkatnya: alam semesta memuai. Ini sesuai dengan konsekuensi matematis model Friedman-Lemaître yang merupakan elaborasi Persamaan Medan Einstein untuk semesta. Data relasi jarak galaksi-galaksi terhadap kecepatan radialnya menjauhi kita ditunjukkan pada Gambar 2. Konstanta Hubble, yang merupakan kemiringan garis relasi jarak terhadap kecepatan tersebut. Harganya sekarang diestimasi sekitar 70 km/detik/Mpc. Artinya, setiap detik skala bentangan bebas 1 Mpc memuai sekecil 1 km. Jika kita balik konstanta Hubble ini, dapat kita peroleh skala umur alam semesta, yakni telah berapa lama alam semesta memuai. Nilai konstanta Hubble tadi memberi estimasi umur semesta sekitar 13,7 miliar tahun. Sangat tua. Hal yang melegakan

adalah dikonfirmasi bahwa semesta lebih tua daripada bintang-bintang tertua di Galaksi Milky Way yang kita estimasi umurnya, antara 11-12 miliar tahun.



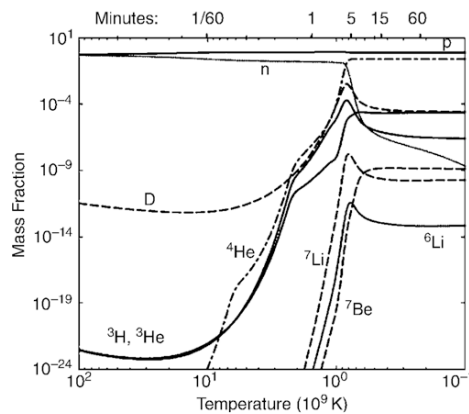
Gambar 2 Diagram Hubble: jarak galaksi versus *redshift* (kecepatan menjauh) menggunakan supernova Type Ia. Kemiringan garis adalah konstanta Hubble atau laju memuai alam semesta. [Sumber: Betoule et al, 2014]



Gambar 3 Distribusi energi foton latar belakang kosmik (Cosmic Microwave Background (CMB) Radiation yang terjaga tetap memenuhi distribusi radiasi benda hitam. [Sumber data: Fixsen et al, 1996]

Gambar 3 menunjukkan distribusi energi foton-foton radiasi latar belakang kosmik yang berjalan semenjak alam semesta baru berumur 400 ribu tahun. yang mengindikasikan alam semesta memuai secara monotonik

dan adiabatik. Penjelasan terincinya tersedia pada bab berikutnya. Studi sejarah termal semesta masa dini juga memberikan jalan untuk mengestimasi kapan inti atom paling sederhana terbentuk, berapa lama prosesnya, dan bagaimana profil kelimpahan hasilnya. Gambar 4 menunjukkan hasil proses pembentukan inti atom (nukleosintesis) primordial yang selesai dalam tiga menit pertama umur semesta.



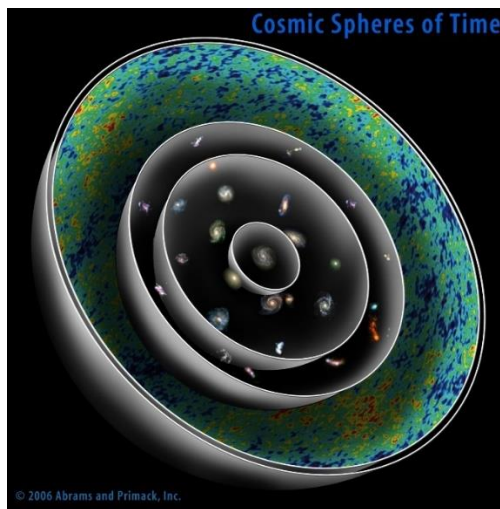
Gambar 4 Hasil nukleosintesa primordial yang sesuai dengan prediksi sejarah termal semesta. [Sumber: Tytler et al, 2000]

1.1.3 Membangun Relasi Parameter Model dan Parameter Observasional

Dari Bumi kita hanya dapat melihat pergerakan relatif benda-benda langit yang dekat seperti Bulan, Matahari, planet-planet dan benda-benda kecil di Tata Surya, serta gerak semu bintang-bintang di Galaksi Bima Sakti. Benda-benda di luar Galaksi kita, seperti galaksi-galaksi lain, terlalu jauh untuk dapat kita deteksi gerakannya. Jadi, gerak galaksi-galaksi jauh itu bukan kita lihat, melainkan kita ukur. Parameter-parameter yang dipakai untuk membangun model kosmologi standar adalah parameter-parameter fisis yang diturunkan dari relasi antara geometri dan fisika yang merupakan esensi persamaan Medan Einstein. Parameter-parameter yang merepresentasikan profil fisis semesta pada umumnya tidak dapat diukur langsung dari observasi, tidak seperti pekerjaan di laboratorium di Bumi. Parameter biasa seperti kerapatan dan tekanan tidak dapat diukur langsung; estimasi massa dan volume bukan pekerjaan trivial dalam kosmologi. Untuk memenuhi keperluan ini, dicarikan parameter perantara yang menghubungkan parameter fisis dengan parameter observasional.

Ide dasarnya memanfaatkan aturan pergeseran frekuensi Doppler: frekuensi gelombang yang diterima oleh pengamat bergeser dari frekuensi gelombang yang diemisikan oleh sumber, dengan besar dan arah pergeseran bergantung pada besar dan arah kecepatan relatif antara sumber dan pengamat.

Cahaya merambat dengan kecepatan 300 ribu km/detik, sangat tinggi, tapi tetap saja berhingga. Akibatnya cahaya perlu waktu dari sumbernya ke tempat lain, termasuk ke kita sebagai pengamat. Dengan jarak sekitar 150 juta km, cahaya dari Matahari memerlukan sekitar 8 menit untuk tiba di Bumi. Dalam kosmologi, objek-objek studinya, yakni galaksi-galaksi penyusun struktur skala besar semesta, terdistribusi dalam volume maharaksasa. Jarak mereka demikian jauh sehingga cahaya memerlukan waktu miliaran tahun untuk tiba di teleskop kita. Oleh karena itu, melihat galaksi-galaksi jauh sama dengan melihat ke masa yang sangat lampau. Lebih dari itu, alam semesta terus memuai, sehingga jarak antargalaksi terus membesar.



Gambar 5 Semakin jauh jarak galaksi yang terlihat, semakin lampau cahaya berangkat dari galaksi itu. [Sumber: Abrams & Primack]

Untuk dapat memanfaatkan relasi Doppler yang disebutkan di atas, kita memerlukan spektrum cahaya objek yang kita amati. Spektrum cahaya ini adalah uraian distribusi energi yang dibawa oleh partikel-partikel cahaya dari sumbernya pada kita. Setiap unsur dan ikatan kimia, kondisi atomik, hadir pada energi yang spesifik, sehingga kita dapat mengenali konstituen

dan kondisi fisik objek studi kita. Selain itu, kinematika internal (kecepatan gerak, dll.) objek dapat kita ketahui dari seberapa besar pergeseran energi konstituen tadi dari harganya jika ia dalam keadaan diam. Inilah pergeseran frekuensi yang berasosiasi dengan gerak relatif antara sumber dan pengamat, yang Doppler nyatakan. Di dalam astronomi pemahaman tentang spektrum adalah tulang punggung pengetahuan, dan relasi Doppler adalah salah satu ruas terpenting.

Bila kecepatan menjauh galaksi-galaksi berasosiasi dengan laju memuai alam semesta seperti diindikasikan oleh grafik Hubble, maka:

$$dv(r) = Hdr, \quad (7)$$

sehingga kecepatan menjauh, pemuaihan skala ukuran semesta, dan waktu berelasi sebagai berikut:

$$\frac{dv}{c} = \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{H}{c} dr = H dt = \frac{da}{a} \equiv dz, \quad (8)$$

$$z = \frac{1}{a} - 1, \quad (9)$$

di mana di atas diperkenalkan pergeseran merah (*redshift*), z , yang merupakan besaran yang dapat diukur pada spektrum galaksi. Sebagai proxy waktu dan ukuran semesta sebagai fungsi waktu, z berperan penting dalam analisis data dan formulasi matematis yang menyangkut ukuran dan skala. Artinya, fungsi terhadap waktu dapat digantikan menjadi fungsi terhadap z ; salah satunya adalah jarak sebagai fungsi z .

Untuk kosmologi di mana jarak yang relevan sangat besar, maka geometri semesta harus diperhatikan. Metrik Robertson-Walker yang diperkenalkan di awal memberi arahan bagaimana mengintegrasikan elemen jarak dalam ruang yang tidak datar.

Ketidakteraturan geometri semesta dapat dikuantisasi oleh parameter densitas, Ω , yang merupakan rasio antara densitas dengan densitas kritis (yakni harga densitas yang membuat geometri semesta datar), sebagai berikut.

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho_m}{\rho_{cr}}; \Omega_r \equiv \frac{\rho_r}{\rho_{cr}}; \Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{cr}}; \Omega_0 = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda, \quad (10)$$

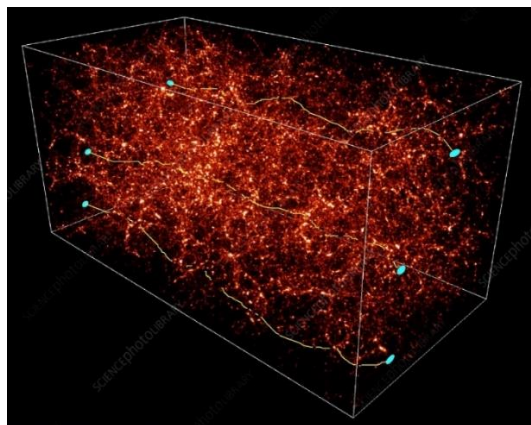
dengan subskrip m , r , Λ , dan 0 berturut-turut berarti materi, radiasi, dan *dark energy* (atau konstanta kosmologi), dan waktu sekarang, serta kerapatan kritis untuk setiap lapisan waktu kosmik:

$$\rho_{cr}(z) \equiv \frac{3H^2(z)}{8\pi G}. \tag{11}$$

Untuk alam semesta datar, $\Omega_0 = 1$, jarak sebagai fungsi dari z adalah:

$$D(z_i, z_j) = \frac{c}{H_0(1+z_j)} \int_{z_i}^{z_j} dz [\Omega_m(1+z) + (1-\Omega_m)]^{-1/2}. \tag{12}$$

Hal yang perlu kita ingat adalah cara menghitung jarak seperti ini mengasumsikan materi terdistribusi secara merata dalam semesta. Kenyataannya materi cenderung mengelompok dalam bintang, galaksi, gugus galaksi, dan filamen-filamen antara gugus-gugus galaksi. Itu sebabnya dalam Bab 3 diangkat isu pelensaan gravitasi di mana lintasan cahaya dibelokkan oleh gumpalan-gumpalan massa tersebut. Artinya, yang dimaksud dengan jarak antara sumber dan pengamat adalah total panjang lintasan cahaya sebagaimana yang cahaya lalui, bukan yang dihaluskan seolah-olah materi terdistribusi secara seragam. Gambar 6 mengilustrasikan maksud tersebut: jarak adalah akumulasi lintasan, termasuk lekak-lekuk akibat pelensaan, bukan dengan menarik garis lurus dari sumber ke pengamat.



Gambar 6 Lintasan cahaya dari sumber ke pengamat berliku mengikuti distribusi potensial gravitasi struktur skala besar semesta. [Sumber: APOD]

1.2 Luaran dan Batasan Model Kosmologi Standar

Model kosmologi yang dirintis oleh Friedman dan Lemaître di atas menggambarkan dinamika global alam semesta dengan memodelkan perubahan faktor skala ukuran alam semesta sebagai fungsi waktu yang bergantung pada isi alam semestanya. Implikasi model ini adalah semesta memuai dari keadaan sangat kecil dan panas. Namun, layaknya sebuah mesin, model ini tidak dapat menentukan sendiri harga parameter-parameter fisis yang menentukan detail dinamikanya; tidak pula model ini dapat menentukan *input* awal yang akan diprosesnya menjadi alam semesta yang kita lihat. Masalah penentuan harga parameter sebagian akan kita bahas pada bab-bab berikutnya, di mana ditunjukkan bagaimana pertimbangan logis memainkan peran dalam mengajukan dugaan awal (asumsi) yang kemudian diikuti dengan strategi pemeriksaannya. Pertanyaan tentang proses fisis yang menghasilkan nilai awal, walaupun penting dan menarik, tidak begitu relevan untuk dibahas di sini.

2 PERTUMBUHAN STRUKTUR SKALA BESAR SEMESTA

Persamaan-persamaan Friedman-Lemaître (5) dan (6) “hanya” memberikan gambaran perubahan ukuran alam semesta, tetapi tidak dapat menjelaskan keberadaan berbagai isi semesta, bintang, galaksi, dan lain sebagainya, serta distribusi dan perubahan detailnya. Untuk keperluan ini relasi fisis yang lebih beragam ditambahkan pada relasi gravitasional skala besar, seperti termodinamika, fisika nuklir, elektromagnetik, termasuk relasi gravitasional pada skala yang lebih halus. Relasi-relasi fisis ini bekerja efektif pada rentang spasial dan rentang energi yang sesuai. Oleh karena itu dalam pembahasan selanjutnya perlu kita cermati kondisi untuk tiap proses fisis yang berjalan, domain spasial dan temporal efektivitasnya, serta luarannya.

Pada tahapan pekerjaan mempelajari evolusi struktur skala besar alam semesta semakin disadari bahwa kosmologi adalah pelajaran sejarah. Dari apa yang diamati, dibantu oleh pemahaman atas hukum-hukum fisika yang pembuktiannya terbatas pada domain dalam Galaksi Bima Sakti, kita menyusun narasi sejarah fisis semesta. Prinsip dasar dalam fisika yang kita andalkan adalah kekekalan energi total. Karena alam semesta fisis ini hanya satu-satunya, semesta ini adalah suatu keseluruhan. Alam semesta memuai membentuk ruang sehingga kita tak perlu memikirkan pusat pemuaian semesta dan tepi semesta. Tak ada luar semesta. Konsekuensi fisisnya adalah energi total yang dimiliki semesta akan selamanya ada, karena tak ada proses keluar-masuk energi; tak ada interaksi dengan luar karena “luar” tak bermakna dalam hal keseluruhan kosmos ini. Singkatnya, alam semesta memuai secara adiabatik. Premis ini amat membantu, karena dapat kita nyatakan kerapatan energi menurun dengan pertambahan volume, sementara persamaan Friedman-Lemaître memberikan relasi antara ukuran semesta dan waktu. Bila kerapatan energi berasosiasi dengan suhu, maka kita bisa hitung suhu semesta dari saat ke saat selama pemuaian. Mengerjakan ini ke arah masa lampau, hasil hitungan menunjukkan alam semesta mulai dengan ukuran kecil, kerapatan tinggi, suhu sangat tinggi. Relasi antara densitas energi, ρ_{energi} , dari waktu ke waktu, suhu, dan skala ukuran semesta:

$$\rho_{energi}(t) \propto \frac{1}{a(t)^3} \propto T \quad (13)$$

2.1 Pertumbuhan Gangguan Akibat Runtuh Gravitasi

Dalam skala yang amat besar, 1 Mpc atau lebih, gaya gravitasi dominan karena walaupun gaya gravitasi jauh lebih lemah daripada gaya elektromagnetik, tetapi jangkauannya panjang (*long-range*). Selain itu, gaya gravitasi bersifat menarik, sehingga dengan pertambahan waktu interaksi, dampak interaksi gravitasi menjadi kumulatif. Oleh karena itu, dalam memikirkan pertumbuhan struktur skala besar, gaya gravitasi adalah penggerak utamanya.

Sistem proses fisis di mana interaksi gravitasi ini berlangsung dapat didekati dengan mekanika fluida, di mana materi “mengalir” mengikuti pemuaihan semesta (untuk selanjutnya disebut sebagai gerak atau kondisi latar belakang), sambil disana-sini kelompok-kelompok materi mengalami interaksi gravitasional lokal.

Jika interaksi gravitasional ini berkelanjutan, densitas di suatu lokasi dapat terus berubah menjadi semakin berbeda dari densitas rata-rata pada lingkungan tersebut. Kontras densitas relatif adalah besaran yang menyatakan perbedaan itu, dan kita sebut sebagai “gangguan”:

$$\delta(\mathbf{r}, t) = \frac{\rho(\mathbf{r}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)}, \quad (14)$$

dengan $\rho(\mathbf{r}, t)$ densitas di posisi vektorial \mathbf{r} pada waktu kosmik t , $\bar{\rho}(t)$ densitas kosmik rata-rata pada waktu kosmik t . Pada prinsipnya densitas kosmik rata-rata ini dihitung, yakni massa atau energi total dibagi volume pada saat kosmik t , di mana laju pertumbuhan volume sebanding dengan $a^3(t)$ dan solusi $a(t)$ mengikuti model kosmologinya.

Untuk memastikan konsistensi “pemantauan” posisi dan gerak, dan juga kerampingan formulasi matematisnya, dipilih kerangka rujukan \mathbf{x} yang bergerak bersama pemuaihan semesta (*comoving frame*):

$$\mathbf{r} = a(t)\mathbf{x}, \quad (15)$$

yang artinya, sepanjang sebuah objek hanya mengalir mengikuti pemuaihan alam semesta saja, posisi \mathbf{x} -nya tidak berubah. Dengan perkataan lain, jarak koordinat antara dua galaksi tak berubah karena pemuaihan semesta, tetapi jarak fisiknya tentu berubah, dengan mengalikan x dengan faktor skala.

Dengan pemikiran ini, gerak sebuah objek terukur oleh pengamat yang tidak bergerak bersamanya adalah:

$$v(\mathbf{r}, t) = \frac{\dot{a}}{a} \mathbf{r} + \mathbf{u}\left(\frac{\mathbf{r}}{a}, t\right), \quad (16)$$

dengan \mathbf{u} kecepatan diri (kecepatan *peculiar*), yaitu kecepatan objek selain kecepataannya mengikuti pemuaian semesta.

Dalam mekanika fluida, wujud kekekalan energi adalah persamaan kontinuitas. Dituliskan dalam kerangka yang bergerak bersama (*comoving frame*) dengan aliran fluida (dalam hal ini aliran memuainya semesta), bentuk persamaan fluida adalah:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho + \frac{1}{a} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (17)$$

di mana $a(t)$ adalah solusi persamaan Friedman-Lemaître, yang artinya kita memilih model kosmologi tertentu sebagai latar belakang, dan ρ densitas pada posisi yang ditinjau. Dengan menyatakan $\rho = \bar{\rho}(1 + \delta)$, maka persamaan kontinuitas untuk δ adalah:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a} \nabla \cdot [(1 + \delta) \mathbf{u}] = 0. \quad (18)$$

Persamaan kunci kedua adalah persamaan Euler yang datang dari kendala kekekalan momentum. Bentuknya untuk kecepatan *peculiar* \mathbf{u} dalam *comoving frame*:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\mathbf{u} \cdot \nabla}{a} \mathbf{u} + \frac{\dot{a}}{a} \mathbf{u} = -\frac{1}{\bar{\rho} a} \nabla P - \frac{1}{a} \nabla \phi, \quad (19)$$

di mana ruas kanan adalah perwujudan Hukum Newton yang menyatakan perubahan kecepatan memerlukan gaya, yang dalam hal ini diberikan dalam bentuk gradien tekanan dan gradien potensial gravitasi. Persamaan keadaan dapat dipilih untuk menyatakan P dalam ρ , sedangkan potensial gangguan dinyatakan dalam persamaan sumber Poisson:

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{x}, t) = 4\pi G \bar{\rho}(t) a^2(t) \delta(\mathbf{x}, t). \quad (20)$$

Pada era kosmik yang amat dini, distribusi pengisi semesta sangatlah halus; gangguan densitas δ maupun kecepatan *peculiar* \mathbf{u} sangat kecil dibandingkan dengan harga rata-rata, $\delta \ll 1$, $\mathbf{u} \ll 1$, sehingga dapat kita abaikan suku-suku dalam persamaan yang berisi orde kedua atau lebih tinggi dalam delta δ atau \mathbf{u} atau campurannya. Setelah langkah matematis yang

disebut linierisasi ini, persamaan kontinuitas dan persamaan Euler dapat digabung menghasilkan persamaan diferensial sederhana:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \frac{\partial \delta}{\partial t} = 4\pi G \bar{\rho} \delta. \quad (21)$$

Persamaan di atas hanya eksplisit diferensial terhadap t , padahal solusinya, δ , bergantung juga pada posisi \mathbf{x} . Oleh karena itu ansatz-nya adalah solusi untuk δ dikonstruksi sebagai berikut.

$$\delta(\mathbf{x}, t) = D(t) \tilde{\delta}(\mathbf{x}), \quad (22)$$

di mana $D(t)$ adalah fungsional solusi dari persamaan diferensial:

$$\ddot{D} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \dot{D} + 4\pi G \bar{\rho}(t) D = 0, \quad (23)$$

dan $\tilde{\delta}(\mathbf{x})$ adalah sebarang fungsi koordinat spasial.

Persamaan (23) adalah diferensial orde kedua, sehingga akan ada dua solusi independen. Dikarenakan kita sedang membangun struktur, maka, sesuai bentuk Persamaan (22), kita pilih solusi yang menumbuhkan gangguan δ . Lebih dari itu, karena persamaan diferensial itu mengandung faktor skala $a(t)$ dan turunannya terhadap waktu, yang merupakan solusi persamaan Friedman-Lemaître dengan pilihan model kosmologi tertentu, maka bentuk spesifik $D(t)$ bergantung pada model kosmologi. Oleh sebab itu evolusi struktur skala besar semesta sensitif terhadap pilihan model kosmologi. Ini sesuai dengan konteks *inverse problem* yang disebutkan di depan, karena dengan membandingkan hasil pengamatan terhadap hasil simulasi komputasional yang menggunakan set persamaan-persamaan di atas dan dengan memvariasikan model kosmologi, kita berharap dapat mengkonstruksi model kosmologi yang paling baik menggambarkan semesta yang kita huni.

Sepanjang pemuaihan kosmik yang diikuti dengan penurunan suhu, berbagai proses fisika bekerja yang bergantian mengambil peran dominan dalam dinamika dan detail. Untuk menghaluskan peralihan-peralihan ini dibangun fungsi transfer yang bentuk dan isinya didikte oleh pengamatan profil global semesta seperti distribusi suhu dan konten utamanya. Ini sebagai cara mengakomodasi komplikasi yang muncul akibat bertumbuhnya pula relasi antarkonstituen yang berinteraksi sepanjang δ tumbuh. Dalam simulasi komputasional evolusi struktur skala besar yang dibahas dalam

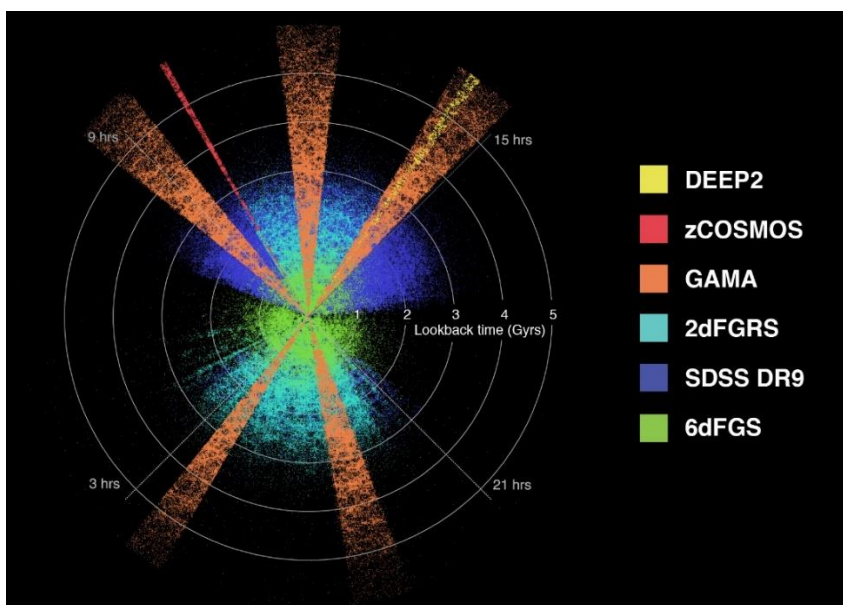
Subsubbab 2.3.2 akan ditunjukkan contoh bentuk fungsi transfer yang umum dipakai.

2.2 Deskripsi Umum Distribusi Struktur Skala Besar

Hasil analisis statistik distribusi survei galaksi sebagai *building blocks* struktur skala besar, dan hasil simulasi komputer yang mengevolusikan struktur ini diperbandingkan untuk memperoleh gambaran fisis proses detail evolusi.

2.2.1 Survei Galaksi untuk Memetakan Struktur Skala Besar

Dalam dua dekade belakangan ini survei galaksi dilaksanakan pada frekuensi optik hingga inframerah-dekat, utamanya menggunakan teleskop-teleskop landas Bumi, dengan pendetailan menggunakan teleskop di ruang angkasa. Gambar 8 menunjukkan salah satu pengkombinasian hasil survei. Pusat lingkaran adalah posisi kita (kita bukan di pusat semesta tetapi di pusat pengamatan), orientasi lingkaran dalam sudut jam adalah orientasi arah langit menurut mata angin, dan arah radial adalah jarak dari kita dalam satuan waktu ke masa lampau, seperti gambar skematik 3-dimensional pada Gambar 8.



Gambar 8 Berbagai survei galaksi dan cakupannya. [Sumber: Driver & GAMA]

Ada dua hal utama yang ingin ditemukan dari survei galaksi seperti ini. Pertama adalah rentang besar fluktuasi densitas yang disebabkan oleh sebaran galaksi-galaksi. Artinya, ingin diperoleh rentang nilai δ seperti yang dinyatakan dalam kontras densitas pada persamaan (14). Kedua adalah memetakan distribusi fluktuasi ini dalam tatanan korelasi antara besar fluktuasi dan ukuran spasial sebaran. Ini dilakukan dengan analisis korelasi dua titik, di mana yang dimaksud dengan titik adalah *property* pada lokasi dan waktu tertentu. *Property* yang dimaksud dapat berupa nilai kontras δ untuk densitas dalam hal sebaran galaksi, atau δ untuk suhu dalam hal CMB. Seperti yang diperkenalkan menjelang Persamaan (14) δ dianggap sebagai gangguan, yang dapat ditinjau sebagai gelombang yang dinyatakan dalam bentuk sinusoidal seperti:

$$\delta(\mathbf{x}) = \int d^3k \delta_k e^{-ik \cdot \mathbf{x}}, \quad (24)$$

yang artinya fluktuasi pada lokasi \mathbf{x} adalah kombinasi linear semua gangguan dengan bilangan gelombang, $k = 2\pi/\lambda$, yang bisa ada dengan masing-masing amplitudo δ_k nya. Fungsi korelasi dua titik, ξ , adalah petunjuk probabilitas bersama hadirnya suatu *property*, misal nilai densitas ρ dengan kontras δ bernilai tertentu, di dua lokasi \mathbf{x} dan \mathbf{y} :

$$\langle \rho(\mathbf{x})\rho(\mathbf{y}) \rangle = \bar{\rho}^2 \langle [1 + \delta(\mathbf{x})][1 + \delta(\mathbf{y})] \rangle \equiv \bar{\rho}^2 [1 + \xi(\mathbf{x}, \mathbf{y})]. \quad (25)$$

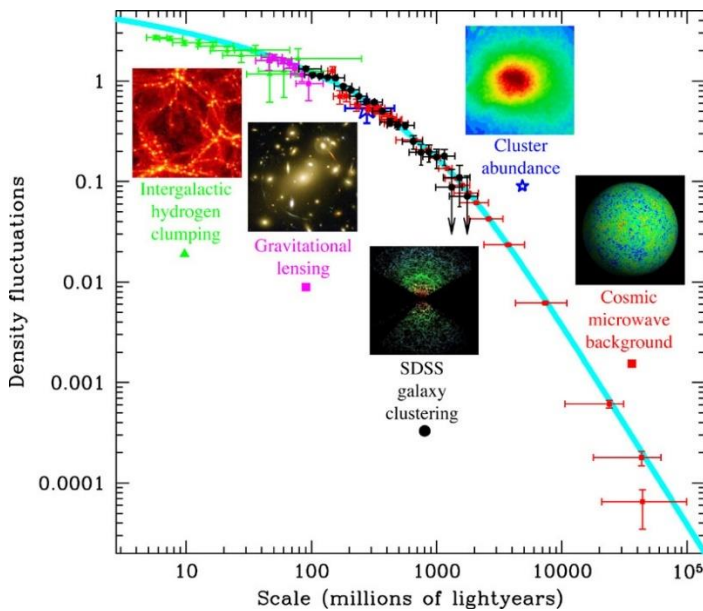
Nilai ξ positif berarti *probable* dua lokasi tersebut memiliki δ yang sama, dan sebaliknya ξ negatif berarti antikorelasi, sedangkan $\xi=0$ berarti distribusi acak (*random*). Untuk alam semesta homogen dan isotropik seperti yang kita asumsikan di awal, jarak vektor antara posisi \mathbf{x} dan \mathbf{y} menjadi jarak linier yang memudahkan pekerjaan matematis.

Hal yang penting dan bermanfaat adalah bahwa fungsi korelasi ini berelasi dengan *power spectrum* sebagai fungsi bilangan gelombang k melalui transformasi Fourier:

$$P(k) = \int_0^\infty dx x^2 \frac{\sin(kx)}{kx} \xi(x). \quad (26)$$

Gambar 9 menunjukkan *power spectrum* densitas pada berbagai skala struktur dari hasil analisis korelasi galaksi, utamanya dari Sloan Digital Sky Survei *data release* awal. Bilangan gelombang k , dapat mewakili ukuran skala sistem, melalui relasi $k = 2\pi/L_c$, dengan L_c suatu panjang karakteristik sistem fisisnya, seperti galaksi, gugus galaksi, dan jejaring awan hidrogen

netral. Halusnya kurva power spektrum untuk berbagai skala ini memberi harapan bahwa gagasan penjelasan tumbuhnya struktur secara hierarkis sesuai dengan apa yang diamati.

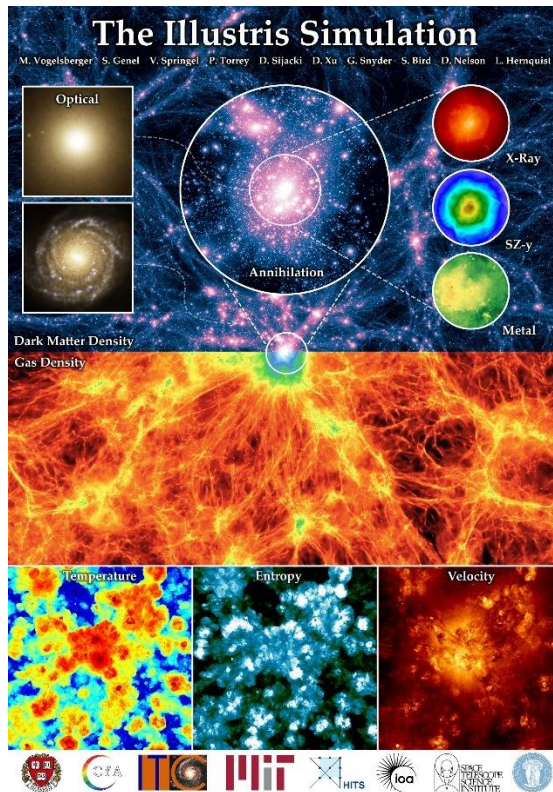


Gambar 9 Fluktuasi densitas sebagai fungsi ukuran skala. [Sumber: Tegmark]

2.2.2 Simulasi Komputasional Evolusi Struktur Skala Besar

Simulasi evolusi kosmologis menggunakan komputer dilaksanakan karena dua alasan utama: (1) proses evolusi alam semesta memakan waktu 13,7 miliar tahun, mencakup volume maharaksasa, tetapi juga detail fisis dari skala subatomik hingga gugus galaksi yang keseluruhannya jelas melampaui batasan eksistensi fisis manusia; (2) alam semesta fisis ini hanya satu-satunya yang dapat kita akses, sehingga kita berhadapan dengan masalah batasan ergodik dalam upaya pengujian teori kosmologis untuk memenuhi permintaan filsafat sains, seperti uji falsifikasi (Weinberg, 2008). Simulasi komputasional mengakomodasi semua proses fisis yang diduga bekerja dalam evolusi semesta dengan syarat batas berupa profil hasil akhir simulasi semesta harus menyerupai hasil pengamatan survei galaksi. Tentunya kendala teknis kemampuan komputasi adalah bagian dari evolusi teknologi, dan ini mengemuka pada resolusi simulasi dan waktu kerja komputer. Metode umum seperti *smoothed particle hydrodynamics* mulai dimanfaatkan untuk kosmologi sejak tahun 1990-an dengan sekitar 260 ribu partikel dan

komputasi evolusi gravitasional saja memakan waktu sekitar tiga bulan. Dewasa ini simulasi evolusi seperti Millennium dan Illustris (Gambar 10) mengakomodasi interaksi gravitasi, elektromagnetik, dan termodinamik, menggunakan lebih dari 10 miliar partikel sehingga resolusi massa jauh lebih halus. Pekerjaan besar seperti ini memakan waktu CPU total sekitar 19 juta jam, tetapi dengan menggunakan delapan ribuan CPU yang bekerja paralel 1 *run* pekerjaan simulasi diselesaikan dalam waktu sekitar tiga bulan.



Gambar 10 Hasil simulasi kosmologis oleh Project Illustris pada skala gugus galaksi: urutan peta dari atas: distribusi densitas materi gelap, distribusi densitas gas, dan peta terbawah: dari kiri ke kanan: distribusi suhu, entropi, dan kecepatan. [Sumber: www.illustris-project.org]

Seperti telah disampaikan pada akhir Bab 1, batas akses informasi untuk membangun pengetahuan adalah pada awal kosmos. Simulasi boleh saja mencoba berbagai kondisi awal, lalu memasukkannya ke dalam mesin evolusi yang juga dapat divariasikan model kosmologinya. Namun tetap saja kebebasan bereksperimen ini dipagari oleh pertimbangan logis.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan: tidak diketahui mekanisme apa yang dapat mendiskriminasi bilangan gelombang k sebagai representasi ukuran gangguan, sehingga pada awal semesta diasumsikan semua k boleh ada. Hanya saja, tidak semua gangguan dapat diproses dalam mesin semesta, tetapi hanya yang ukurannya lebih kecil daripada ukuran horizon semesta. Ukuran horizon adalah ukuran panjang maksimal yang foton dapat lintasi diberikan umur alam semesta sebagai waktu maksimal. Dengan pengertian ini, ukuran horizon memuai dengan bertambahnya umur semesta.

Ukuran horizon terkait dengan waktu jelajah foton dari suatu lokasi ke lokasi lain. Keterkoneksi kedua lokasi ini memungkinkan adanya relasi kausal antara kedua lokasi tersebut. Karena foton adalah partikel dengan kecepatan tertinggi, maka relasi kausal antara dua titik ditentukan oleh apakah dalam umur semesta foton cukup waktu untuk berjalan dari titik pertama ke titik kedua. Bila tidak, maka relasi fisis antara keduanya belum dapat berlangsung. Dalam pemikiran inilah tidak semua panjang gelombang gangguan dapat diproses seketika; secara berurutan mulai dari panjang gelombang pendek masuk diproses, dan yang lebih panjang menanti ukuran horizon membesar dengan waktu.

Walau demikian, diasumsikan bahwa *power spectrum* gangguan awal berkontribusi dengan power yang sama untuk semua k :

$$P(k) = Ak, \tag{27}$$

yang dikenal dengan spektrum Harrison-Zel'dovich. Kesamaan kontribusi ini pun diasumsikan karena kita tidak mengetahui mekanisme fisis apa yang mengatur *power spectrum* gangguan awal. Namun *power spectrum* dengan bentuk ini tidak dapat bertahan seterusnya. Seperti disebutkan pada akhir Subbab 2.1, pertumbuhan besar kontras densitas δ dan kecepatan peculiar \mathbf{u} menyebabkan pertumbuhan kerumitan relasi. Perubahan *power spectrum* dapat diakomodasi dengan menyelipkan fungsi transfer $T(k)$ dengan cara:

$$P(k) = AkT^2(k). \tag{28}$$

Pada Persamaan (27) dan (28) A adalah amplitudo dan berdimensi (panjang)⁴, dan bentuknya adalah (Smoot et al, 1992):

$$A = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{6\pi^2}{5} Q_2^2 R_H^4, \tag{29}$$

dengan Q_2 suhu CMB pada anisotropi kuadropol dan R_H radius horizon. Dalam simulasinya, Martel, Premadi, & Matzner (1998) menggunakan harga A yang ditawarkan oleh Bunn, et al (1995): $A=1.3 \times 10^7 \text{ Mpc}^4$, yang lazim untuk evolusi struktur berdasarkan skema Cold Dark Matter.

Kita perkenalkan sekarang bentuk fungsi transfer yang dipakai untuk menghaluskan transisi dalam proses evolusi kontras (Bardeen et al, 1986):

$$T(k) = \mathcal{L}(z) \frac{\ln(1+2.34q)}{2.34q} [1 + 3.89q + (16.1q)^2 + (5.46q)^3 + (6.71q)^4]^{1/4}, \quad (30)$$

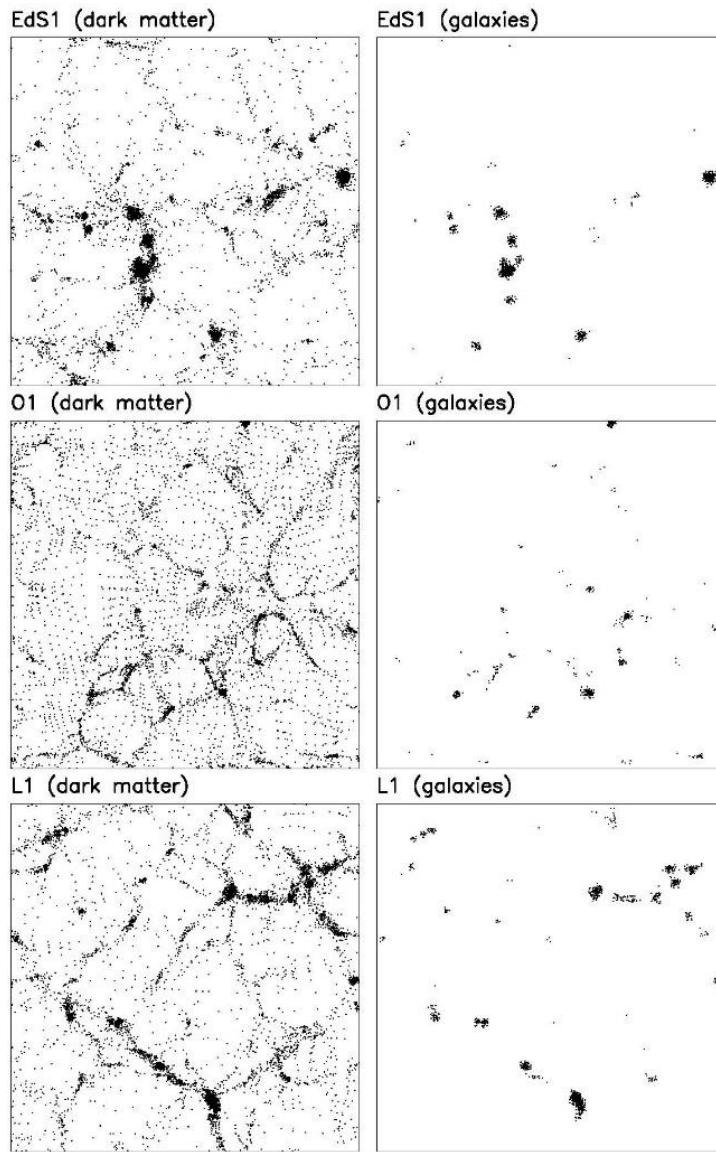
di mana $\mathcal{L}(z)$ adalah faktor pertumbuhan gangguan linier dan

$$q = k\theta^{1/2}/\Omega_x h^2 \text{Mp}. \quad (31)$$

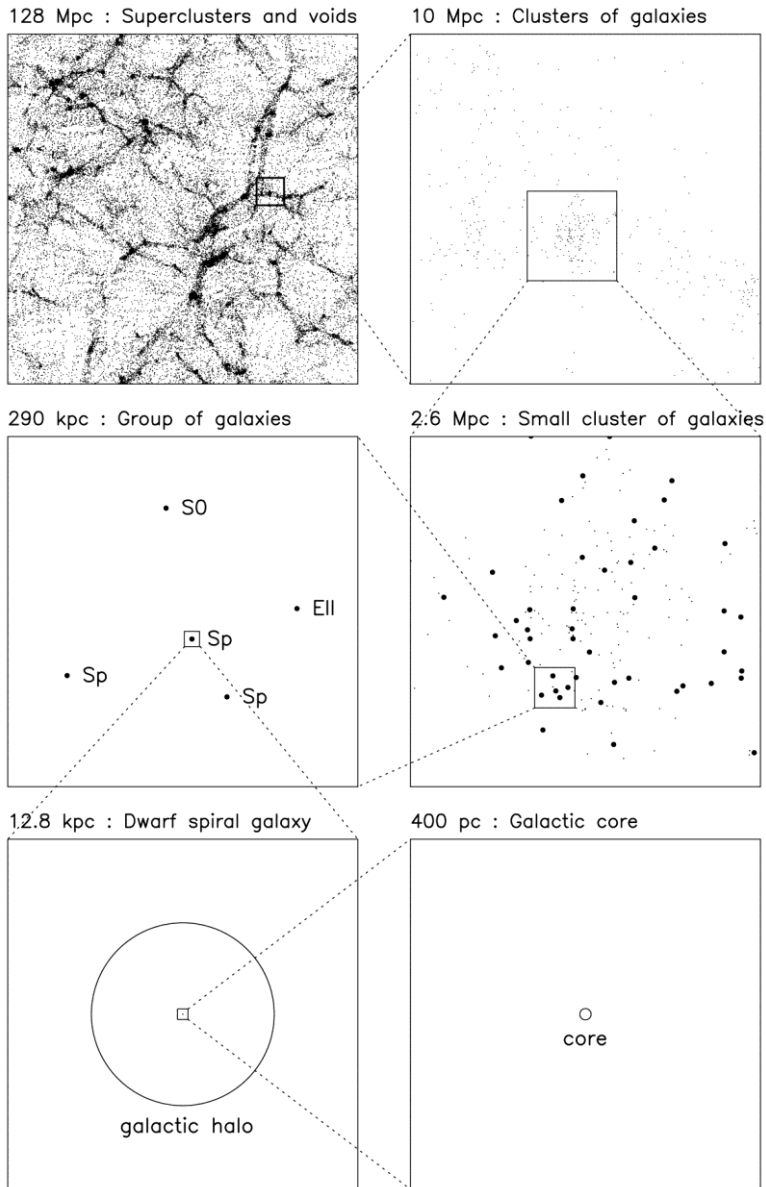
dengan Ω_x parameter densitas materi gelap non-baryonik, dan $\theta=1$ untuk model dengan 3 *flavour* neutrino relativistik.

Hasil simulasi struktur skala besar yang hanya mengikutkan materi gelap (skema Cold Dark Matter) kemudian menjadi dasar untuk menentukan di mana akan ada galaksi (materi bercahaya) dengan menetapkan harga densitas ambang. Bila ambang ini dilampaui di suatu lokasi, maka akan ada galaksi di lokasi tersebut. Artinya galaksi akan cenderung berada di tempat dengan densitas materi gelap yang lebih daripada densitas rata-rata. Ini dikerjakan untuk tiga model kosmologi: model Einstein-de Sitter dengan kurvatur datar di mana semesta berisi seluruhnya materi, model terbuka di mana $\Omega_0 < 1$, dan model datar berisi 25% materi dan 75% konstanta kosmologi. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 11. Panel kiri adalah distribusi materi gelap, dan panel kanan adalah distribusi galaksi yang berada pada area dengan densitas tinggi.

Gambar 12 menunjukkan rentang resolusi dinamik simulasi struktur skala besar ini dari 128 Mpc hingga 400 pc, artinya dari ukuran jejaring gugus galaksi hingga ukuran pusat galaksi. Dengan demikian kita dapat cukup mengikuti detail pertumbuhan struktur skala besar untuk berbagai kepentingan studi kosmologi lebih lanjut.



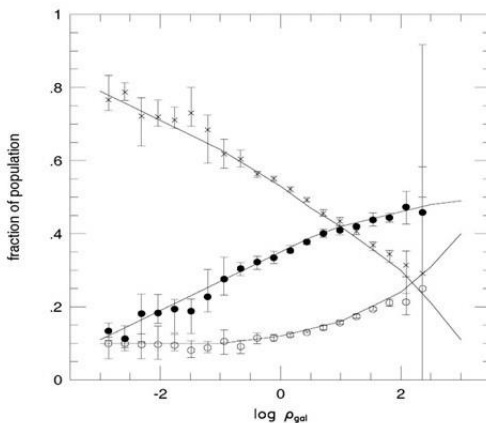
Gambar 11 Hasil evolusi struktur skala besar: Panel kiri: distribusi materi gelap pada $z=0$; panel kanan distribusi galaksi pada daerah berdensitas tinggi. [Sumber: Martel et al, 1998]



Gambar 12 Rentang dinamik simulasi: dari 128 Mpc hingga 400 pc. [Sumber: Martel et al, 1998]

Pekerjaan berikutnya adalah menentukan morfologi galaksi berdasarkan relasi Dressler (1980) yang menemukan di dalam gugus galaksi, distribusi morfologi galaksi cenderung terdemarkasi: galaksi elips di daerah densitas lebih tinggi daripada galaksi spiral. Penentuan morfologi lalu dilaksanakan melalui proses Monte Carlo untuk membebaskan dari bias sistematis. Distribusi morfologi dapat dilihat pada Gambar 13. Setelah morfologi

ditentukan, berikutnya adalah memberikan profil yang khas untuk tiap morfologi berupa kecepatan internal, ukuran inti, dan ukuran halo. Dengan demikian diketahui profil massa galaksi untuk keperluan pelensaan yang akan dijelaskan pada Bab 3.



Gambar 13 Distribusi morfologi galaksi terhadap densitas lingkungan menyerupai relasi Dressler. [Sumber: Martel et al, 1998]

2.3 Mengenali Bibit Struktur Skala Besar

Dengan pilihan model kosmologi tertentu, Persamaan (23) siap menjadi mesin pembangun struktur skala besar. Pertanyaannya: bagaimana dengan *input* untuk mesin ini? Persamaan (19) menunjukkan perlunya nilai gradien tekanan dan gradien densitas tidak nol. Artinya distribusi tekanan dan densitas tidak bisa seragam sempurna. Pertanyaan berikutnya, seberapa tidak seragam bibit yang diperlukan dan bagaimana distribusi ketidakseragaman (inhomogenitas) ini. Ada dua pertimbangan penting untuk memulai memikirkan jawaban untuk pertanyaan ini. Pertama, interaksi gravitasi bekerja atas partikel-partikel bermassa yang tidak bermuatan. Maka, proses perpindahan massa karena interaksi gravitasi baru dapat terjadi ketika partikel-partikel di dalam semesta telah berada dalam keadaan netral (tidak bermuatan listrik). Kedua, studi sejarah termal semesta mendiktekan bahwa alam semesta bermula dengan suhu amat tinggi dan berangsur mendingin. Pada era di mana suhunya amat tinggi, partikel-partikel amat energetik, sehingga sulit untuk berinteraksi dan membuat ikatan-ikatan. Partikel-partikel berada dalam keadaan sebebaskan mungkin

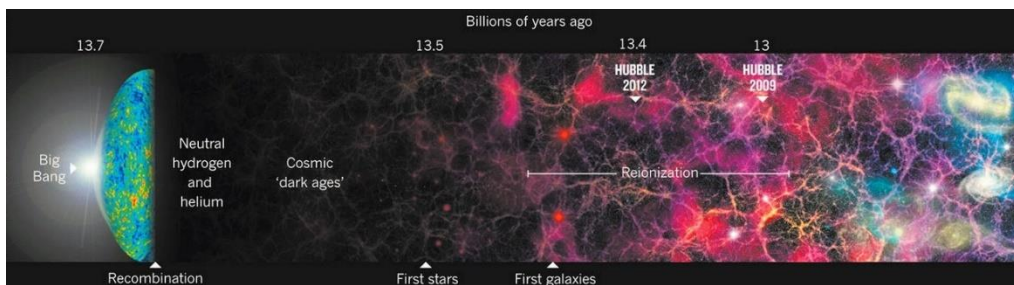
tanpa ikatan. Elektron-elektron berada dalam keadaan bebas karena energinya terlalu tinggi untuk dapat diikat oleh inti atom. Akibatnya inti atom yang bermuatan positif dan elektron bebas yang bermuatan negatif, semua dalam keadaan bebas dan bergerak dengan kecepatan tinggi. Konsekuensi dari dua hal penting ini adalah: (1) gravitasi belum dapat bekerja dengan efektif karena partikel-partikel masih bermuatan listrik, sehingga gaya elektromagnetik lebih dominan (selain juga karena ukuran semesta masih kecil sehingga jarak bebas rata-rata antar partikel juga pendek); (2) elektron bebas dan foton (partikel cahaya) berinteraksi dalam bentuk hamburan yang disebut dengan hamburan Compton. Peristiwa hamburan ini mengubah arah gerak foton dan berlangsung terus-menerus dengan efektif. Akibatnya foton-foton tidak dapat berpropagasi jauh, tetapi terperangkap dalam distribusi materi bermassa. Distribusi energi foton secara garis besar mengikuti distribusi radiasi benda hitam karena kesetimbangan termal semesta yang terjaga akibat semesta memuai secara adiabatik. Tetapi detail distribusi energi foton bersesuaian dengan distribusi densitas (atau potensial gravitasi) materi. Hal ini bisa diduga juga menggunakan pemikiran Teori Relativitas Umum yang mengatakan kinematik foton juga mengikuti aturan geometri ruangwaktu. Dari pemikiran ini diperoleh relasi antara inhomogenitas potensial gravitasi dengan inhomogenitas energi foton (diwakili oleh distribusi suhunya), dalam bentuk:

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{1}{3} \frac{\delta \phi}{c^2} \quad (32)$$

yang disebut sebagai relasi Sachs-Wolfe. Sebelum relasi ini dapat kita manfaatkan, kita kembali dulu ke pembahasan tentang runutan sejarah termal semesta di era dini.

Ketika alam semesta telah memuai sekitar 300 ribu tahun semenjak awal mulainya semesta, suhu semesta sudah banyak turun, demikian pula energi rata-rata elektron bebas. Perlahan energi elektron terus turun hingga lebih rendah daripada energi ikat atom hidrogen. Dengan demikian secara berangsur elektron terikat oleh inti atom sederhana dan terbentuklah atom-atom hidrogen netral. Proses ini berlangsung amat bertahap karena melalui interaksinya dengan foton, elektron masih dapat menerima pasokan energi dari foton berenergi tinggi yang berada pada ekor Wien distribusi Planck sehingga dapat lepas lagi dari ikatan inti atom. Baru setelah seluruh energi

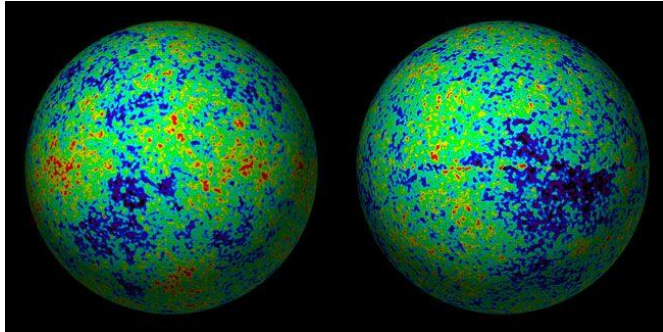
foton telah lebih rendah daripada energi ikat atom hidrogen, seluruh elektron terdistribusi dalam ikatan inti atom hidrogen dan helium. Kondisi ini menandai dua hal penting dalam sejarah semesta: (1) karena atom menjadi netral, gaya gravitasi dapat mulai bekerja dengan efektif, dan (2) karena elektron-elektron telah terikat dalam atom, foton-foton dapat bergerak bebas tanpa halangan. Konsekuensi dari (1) adalah persamaan (23) mulai bekerja sehingga δ dan u terus tumbuh. Konsekuensi dari (2) adalah foton-foton yang dapat berpropagasi bebas untuk pertama kalinya terus melanglang buana ke segala penjuru semesta dan mengikuti pemuaiannya semesta. Sebaran foton ini kita amati dan kita beri nama radiasi *Cosmic Microwave Background* (CMB). Foton-foton CMB berjalan sejak alam semesta berumur sekitar 400 ribu tahun atau dari *redshift* z sekitar 1100, hingga kita amati sekarang ketika usia alam semesta sekitar 13,7 miliar tahun (dan *redshift* $z=0$), sehingga suhu rata-ratanya sekarang hanya 2.7 Kelvin. Ada inhomogenitas kecil yang terbaca pada sebaran suhu foton yang orde $\frac{\delta T}{T} \approx 10^{-5}$. Interpretasi relasi Sachs-Wolfe Persamaan (32) mengindikasikan bahwa pada orde yang samalah kontras densitas δ yang menyebabkan inhomogenitas pada sebaran suhu foton CMB. Persamaan (29) dan penjelasan di bawahnya menunjukkan bagaimana profil fluktuasi suhu CMB menjadi petunjuk magnitud dan sebaran bibit untuk evolusi struktur skala besar. Dengan cara ini, telah kita temukan ukuran input untuk mesin evolusi $D(t)$ dari Persamaan (23). Gambar 14 adalah ilustrasi skematik evolusi dari CMB ke galaksi-galaksi.



Gambar 14 Ilustrasi skematik evolusi dari bibit hingga struktur skala besar berupa jejaring galaksi-galaksi. [Sumber: Nature]

Gambar 15 menunjukkan sebaran suhu foton CMB pada seluruh bola langit dengan rata-rata 2.7 Kelvin. Perbedaan suhu yang ditunjukkan dengan warna yang berbeda sebetulnya sangat kecil. Untuk dapat mendeteksi

fluktuasi suhu yang lebih halus dengan resolusi spasial yang halus juga, dilakukan analisis *multipole* hingga bentangan sudut yang amat kecil.

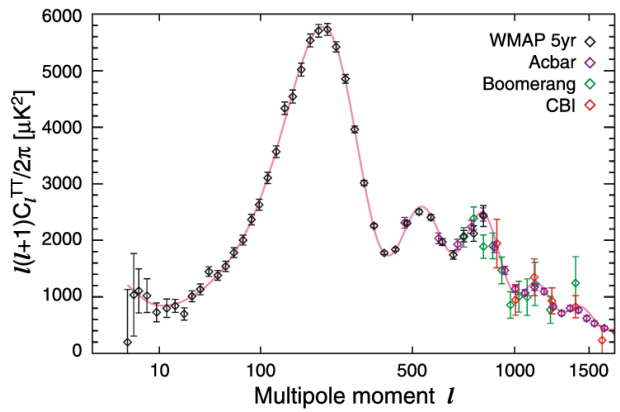


Gambar 15 Sebaran suhu CMB pada bola langit. [Sumber: WMAP]

Analisis multipol ini diikuti dengan studi korelasi dua titik seperti Persamaan (25) tetapi untuk δT , di mana dua titik yang dimaksud adalah semua pasangan lokasi dengan variasi jarak yang ditentukan oleh pembagian multipol. Kehalusan pekerjaan ini jelas memerlukan kehalusan resolusi spasial data. Pengukuran suhu CMB dilakukan menggunakan berbagai instrumen yang peka terhadap frekuensi inframerah hingga radio yang dipasang pada berbagai wahana seperti balon udara dan teleskop di Antarktika, juga wahana luar angkasa. *Cosmic Microwave Background Explorer* (COBE) yang berfungsi pada era 1990-an memiliki resolusi spasial hanya sekitar 7° , tetapi berhasil menunjukkan bahwa memang semesta kita memuai secara adiabatik, suatu dobrakan besar dalam sejarah pengetahuan. Kita jadi punya landasan pengamatan tentang bagaimana sejarah semesta kita. Hasil COBE mendorong pertanyaan berikutnya tentang sejarah pembentukan struktur skala besar, dan ini memerlukan resolusi yang jauh lebih halus. Misi pengamatan CMB generasi berikutnya, yakni Wilkinson Microwave Anisotropy Map (WMAP), menangkap tantangan itu dengan resolusi $0,5^\circ$, dan yang tengah beroperasi sekarang, Planck, beresolusi $0,16^\circ$.

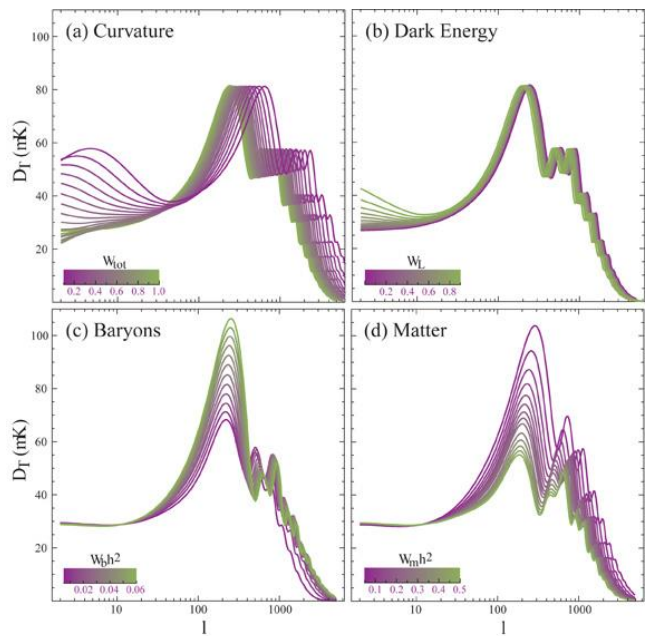
Hasil analisis multipol dan aplikasi Persamaan (26) menghasilkan fitur *power spectrum* yang memiliki beberapa puncak seperti ditunjukkan pada Gambar 16. Ini menunjukkan bahwa fluktuasi yang berbeda nilainya tersebar dalam kelompok-kelompok yang ukurannya berbeda. Bahwa tampak data tersebar amat dekat dari kurva yang diperoleh dari pemodelan kosmologi mengindikasikan pemodelan kita baik sekali. Pembacaan detail *power spectrum* inilah yang menjadi masukan untuk mengendala model-

model detail kosmologi, termasuk fungsi transfer yang kita perlukan untuk simulasi evolusi struktur skala besar yang tertulis pada Persamaan (29), (30), dan (31).



Gambar 16 Power spectrum fluktuasi suhu CMB. [Sumber: WMAP Team]

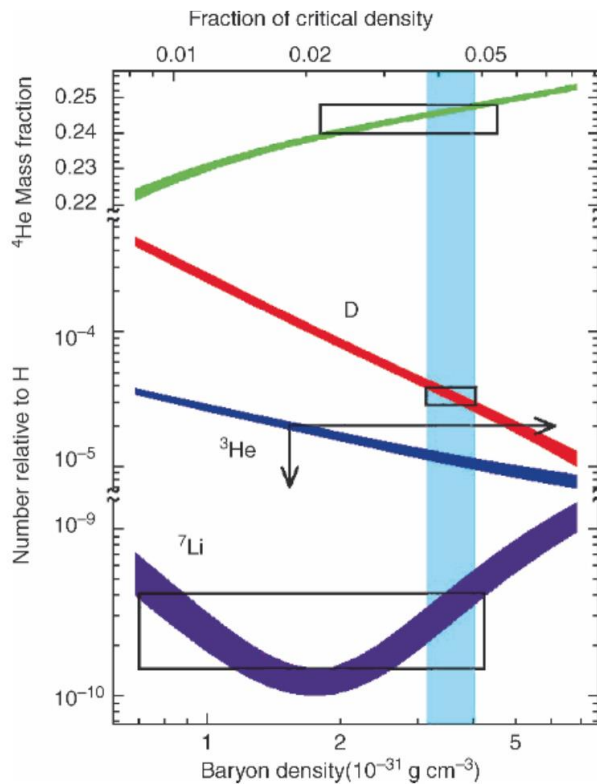
Kebergantungan fitur *power spectrum* pada model kosmologi telah kita lihat rumusnya melalui enkorporasi Persamaan (30) ke Persamaan (28). Peran masing-masing parameter kosmologi pada fitur *power spectrum*, artinya pada fitur evolusi struktur, ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17 Ilustrasi kebergantungan power spectrum CMB pada model kosmologi. [Sumber: Tegmark]

2.3 Peran Materi Baryon, Materi Gelap Non-Baryon, dan Energi Gelap dalam Evolusi Struktur Skala Besar

Dari studi pada skala galaksi, yang diawali dengan studi kinematik galaksi bermorfologi piringan, diketahui bahwa sebagian besar massa galaksi tidak bercahaya, yang kemudian disebut sebagai *dark matter* atau materi gelap. Studi tentang proses nukleosintesis (pembentukan inti atom) pada era primordial, yakni tiga menit pertama setelah alam semesta mulai, menghasilkan batasan untuk jumlah materi baryonik. Gambar 18 menunjukkan bagaimana kelimpahan deuterium memberikan batasan ketat untuk jumlah baryon. Ini mendorong kesimpulan bahwa tidak hanya ada materi gelap, tetapi sebagian besar dari materi gelap itu non-baryonik.



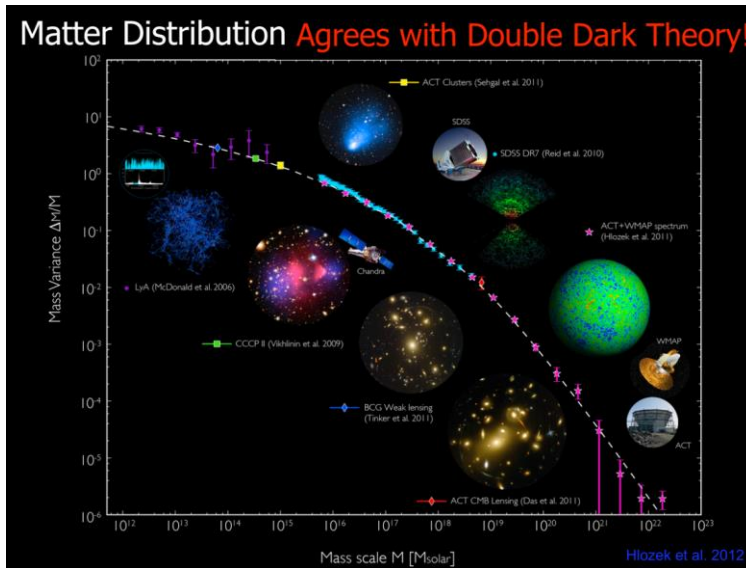
Gambar 18 Fraksi kelimpahan produk nukleosintesa primordial sebagai fungsi densitas baryon: perhitungan dan hasil pengamatan. [Sumber: Tytler et al, 2000]

Materi non-baryonik ini gelap karena selain tidak menghasilkan cahaya, tidak juga berinteraksi dengan partikel cahaya, bahkan sangat diduga berinteraksi dengan sangat lemah partikel lain. Namun, karena fraksinya

yang besar, materi gelap berperan penting dalam evolusi struktur skala besar. Aglomerasi dan pergerakan gravitasional didominasi dan disetir oleh materi gelap. Materi baryon yang sedikit hanya mengikuti aliran materi gelap dan terperangkap dalam sumur-sumur potensial yang dibangun oleh aglomerasi materi gelap. Galaksi yang kita lihat beranalogi dengan gunung es (*iceberg*): yang terlihat di atas permukaan laut hanyalah sebagian kecil dari keseluruhan gunung es; fraksi yang jauh lebih besar dan meluas ada di bawah permukaan laut. Proporsi antara materi gelap dan materi tampak/bercahaya (*luminous matter*) dirumuskan sebagai rasio massa terhadap luminositas, $b \equiv \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$, dinyatakan dalam satuan massa Matahari, M_{\odot} , terhadap luminositas Matahari, L_{\odot} . Hasil studi galaksi dan gugus galaksi mengestimasi untuk galaksi b bernilai puluhan, dan untuk gugus galaksi bernilai ratusan (Weinberg, 2008). Membesarnya nilai b ini berarti sistem yang lebih besar menyimpan porsi materi gelap yang lebih banyak. Untuk memastikan dugaan ini, kita perlu mencari berbagai cara untuk dapat mendeteksi materi gelap. Caranya akan memerlukan tampilan hasil interaksi gravitasional yang melibatkan materi gelap karena menurut pemikiran konservatif, materi gelap hanya berinteraksi secara gravitasional. Dengan membandingkan power spectrum distribusi galaksi simulasi (panel kanan Gambar 11) dan power spectrum distribusi galaksi hasil survey, kita bisa menyusun keberadaan materi gelap. Tentunya dengan keterbatasan pengamatan: kita hanya bisa mengamati galaksi yang ada dalam jangkauan pengamatan teleskopnya.

Tantangan lain dalam kosmologi abad ini adalah interpretasi atas jarak sejumlah supernova jauh yang mengindikasikan bahwa pemuaian alam semesta dipercepat yang memerlukan adanya konstituen semesta yang dapat mendorong pemuaian ini. Semua jenis partikel bermassa maupun yang masih hipotetikal seperti partikel-partikel non-baryonik, dan foton, tidak dapat menyebabkan gaya dorong ini. Konstituen baru ini dikenal dengan berbagai nama, mulai dari konstanta kosmologi (interpretasi baru atas konstanta kosmologi yang diusulkan Einstein), energi vakum (energi yang inheren dimiliki oleh ruang, sehingga bertambah dengan memuainya semesta), dan energi gelap (*dark energy*) yang menginspirasi banyak gagasan model perilakunya, bahkan gagasan fisika baru. Yang jelas energi gelap ini dampaknya berbalikan dari gravitasi, yaitu memisahkan dan hanya bekerja pada skala besar, di atas ukuran Mpc, dengan catatan tak ada sistem

gravitasional diri yang harus dilawannya pada skala itu. Apapun energi gelap ini, mestilah ia tidak menghambat pertumbuhan struktur pada masa awal sebab alam semesta yang kita lihat sudah dihiasi oleh galaksi-galaksi. Bahkan sejak pergeseran merah tinggi, jika kita percaya sepenuhnya pada hasil estimasi jarak galaksi-galaksi jauh yang ditemukan oleh James Webb Space Telescope (antara lain: Rodighiero et al, 2023). Gambar 19, adalah pengkinian Gambar 9 dengan mengakomodasi energi gelap dalam menginterpretasi hasil pengamatan.



Gambar 19 Variansi massa sebagai fungsi ukuran skala berbagai jenis eksistensi struktur semesta. [Sumber: Hlozek et al, 2012]

Itu sebabnya dewasa ini didorong pengamatan objek-objek jauh untuk dapat diestimasi jaraknya seakurat mungkin, untuk mengetahui sekitar kapan energi gelap mulai mendominasi dinamika kosmik. Untuk menjawab tantangan ini yang paling diperlukan adalah deskripsi sebaik mungkin tentang bagaimana struktur tumbuh pada berbagai skala: massa maupun ukuran bentangan potensialnya. Pengamatan ekstragalaksi pada volume yang sangat dalam dapat melihat jejak evolusi dengan memeriksa detail kandungan kimia maupun struktur internal objeknya. Proyek-proyek yang mengejar ini antara lain *Dark Energy Survey*, yang diteruskan dengan pengamatan yang memanfaatkan teleskop-teleskop besar generasi terkini, di Bumi maupun di luar angkasa, pada panjang berbagai panjang gelombang.

3 LENSA GRAVITASI SEBAGAI PERANGKAT KOSMOLOGI

Salah satu konsekuensi persamaan Medan Einstein adalah lintasan cahaya pun patuh pada kelengkungan ruangwaktu yang disebabkan oleh adanya potensial gravitasi. Dikarenakan pelengkungan lintasan cahaya ini mengubah posisi dan profil tampakan sumber, fenomena ini lalu disebut sebagai pelensaan gravitasi (*gravitational lensing*). Pelensaan gravitasi pertama kali diamati saat gerhana matahari total tahun 1919 dan menjadi bukti pendukung Teori Relativitas Umum Einstein untuk skala massa dan jarak bintang. Pelensaan gravitasi pada skala massa dan jarak ekstragalaksi baru dikonfirmasi pada tahun 1979. Semenjak itu penelitian tentang pelensaan gravitasi sebagai proses, sebagai kasus lensa individu yang dilengkapi dengan pengamatan, pada berbagai skala massa dan jarak semakin banyak diminati. Tuntunan studi fondasional pelensaan gravitasi diberikan dalam Schneider, Ehlers, & Falco (1992). Tak lama kemudian dimulai juga studi pelensaan gravitasi untuk keperluan kosmologi. Hal yang disebutkan terakhir ini yang menjadi fokus kita di sini. Perkembangannya pesat karena dukungan data pengamatan dan kemajuan teknologi komputasi.

3.1 Reviu Prinsip Dasar Pelensaan Gravitasi

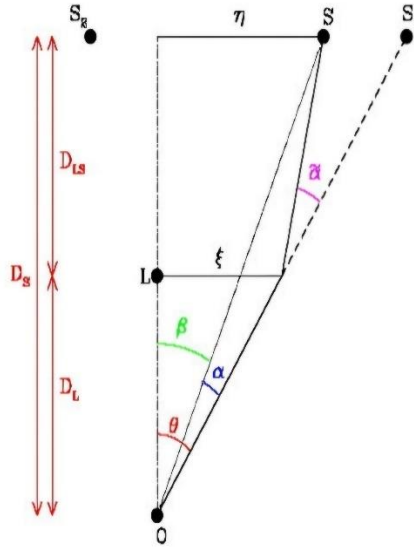
Pada intinya pelensaan gravitasi adalah “dibelokkannya” lintasan cahaya dari sumber jauh oleh potensial gravitasi massa yang berada di antara sumber dan pengamat, lalu terfokuskan pada posisi pengamat. Skema konfigurasinya adalah seperti pada Gambar 20.

Dari Gambar 20 kita peroleh relasi geometris yang menjadi persamaan lensa:

$$\beta = \theta - \frac{D_{LS}}{D_S} \hat{\alpha}(D_L \theta). \quad (33)$$

Dari Teori Relativitas Umum kita peroleh besarnya sudut belok α yang disebabkan oleh massa yang terkandung dalam bola beradius ξ di seputar pusat lensa, dengan ξ adalah jarak terdekat antara lintasan cahaya dan pusat lensa:

$$\hat{\alpha}(\xi) = \frac{4G}{c^2} \int d^2\xi' \Sigma(\xi') \frac{\xi - \xi'}{|\xi - \xi'|^2}. \quad (34)$$



Gambar 20 Skema geometris pelensaan gravitasi dengan O (*Observer/Pengamat*), S (*Source/Sumber cahaya*), S₁ dan S₂ citra pelensaan, L (*Lens*), alpha α sudut belok, θ dan ϑ vektor sudut-sudut posisional, ξ *impact parameter*, D_L , D_S , dan D_{LS} jarak-jarak kosmologis antara posisi-posisi yang ditunjukkan.

Dalam Persamaan (34) $\Sigma(\xi')$ adalah densitas permukaan beradius ξ yang (densitas bola beradius ξ yang diproyeksikan pada permukaan di bidang lensa). Dengan memperkenalkan potensial skalar efektif berdimensi dua $\psi(\theta)$, sudut belok dinyatakan sebagai gradien: $\nabla_{\theta}\psi = \hat{\alpha}$, dengan

$$\psi(\theta) = \frac{2}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \int \phi(r) dz, \quad (35)$$

dengan $\phi(r)$ potensial Newtonian yang telah diperkenalkan secara umum pada Bab 2, dan integral efektifnya dilakukan mencakup ekstensi lensa.

Pelensaan akan terjadi jika densitas permukaan ini melampaui harga densitas kritis lensa, yaitu:

$$\Sigma_{cr} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_S}{D_L D_{LS}}. \quad (36)$$

Rasio jarak-jarak kosmologis di atas memastikan bahwa pelensaan gravitasi ini difokuskan ke pengamat di posisi O. Ini mengingatkan bahwa pembelokan lintasan cahaya dapat terjadi di mana saja asalkan densitas permukaannya melampaui densitas rata-rata (artinya kurvatur lokal melebihi kurvatur rata-rata lingkungan), tetapi untuk dapat kita lihat, pelensaannya harus terfokuskan pada posisi kita. Untuk keuntungan kita, karena rumusan jarak kosmologis memasukkan parameter kosmologi, maka efek lensa gravitasi juga dapat dipakai untuk memeriksa model kosmologi.

Kita dapat meninjau pelensaan gravitasi sebagai pemetaan matematis dari posisi sumber ke posisi citra, atau sebaliknya, dengan persamaan lensa sebagai persamaan pemetaan. Dengan tinjauan pemetaan ini, analisis karakter pelensaan dilakukan melalui pemeriksaan matriks Jacobian pemetaannya:

$$\mathcal{A} = \left[\frac{\partial \beta}{\partial \theta} \right] = \delta_{ij} - \frac{\partial \alpha_i(\theta)}{\partial \theta_j} = \delta_{ij} - \frac{\partial^2 \psi(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j}. \quad (37)$$

Dikarenakan pelensaan tidak mengubah kecerlangan permukaan, maka rasio luas permukaan citra terhadap luas permukaan sumber memberikan besarnya magnifikasi kecerlangan. Dengan perkataan lain, invers determinan matriks Jacobian itu memberikan nilai magnifikasi:

$$\mu = \frac{1}{\det \mathcal{A}}. \quad (38)$$

Detail profil potensial skalar menentukan morfologi citra. Kita dapat lihat ini dengan menuliskan matriks:

$$\psi_{12} = \frac{\partial^2 \psi(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j}, \quad (39)$$

yang *trace*-nya:

$$tr(\psi_{12}) = \psi_{11} + \psi_{22} = 2\kappa, \quad (40)$$

dengan κ adalah konvergensi (*convergence*) yang membesarkan atau mengecilkan ukuran citra secara radial, sedangkan:

$$\gamma_1(\theta) = \frac{1}{2}(\psi_{11} - \psi_{22}) = \gamma(\theta)[\cos 2\varphi(\theta)] \quad (41)$$

$$\gamma_2(\theta) = \psi_{12} = \psi_{21} = \gamma(\theta)[\sin 2\varphi(\theta)], \quad (42)$$

adalah *shear* yang melengkungkan citra mengikuti gaya pasang-surut ke arah sudut orientasi φ .

3.2 Pengembangan Teknik Pelensaan Gravitasi untuk Studi Struktur Skala Besar

Pelensaan gravitasi kuat (*strong gravitational lensing*) relevan dengan kosmologi karena lensanya (dan massanya) besar dalam rentang massa galaksi hingga gugus galaksi, dan mencakup bentangan jarak atau volume kosmologis. Persamaan (12) menunjukkan bagaimana rumusan untuk jarak bergantung pada model kosmologi. Tepatnya bergantung pada kurvatur geometri semesta, yang menurut persamaan Medan Einstein (Persamaan (1)) bergantung pada isi semesta.

Untuk keperluan studi pelensaan gravitasi Persamaan (2), (3), dan (4) kita tuliskan dalam bentuk yang lebih kompak dengan memperlihatkan secara eksplisit kehadiran potensial Newtonian, Φ , yang relevan dengan distribusi massa yang inhomogen sebagai berikut.

$$ds^2 = a^2(\eta)[-(1 + 2\Phi)d\eta^2 + (1 - 2\Phi)\gamma_{ij}dx^i dx^j], \quad (43)$$

di mana η adalah waktu konformal, γ_{ij} adalah submetrik spasial, dan digunakan notasi perkalian-pertambahan Einstein. Untuk skala global sebaran Φ dapat dibuat halus agar rata-ratanya memberikan kurvatur latar belakang yang sama di seluruh ruang. Namun dengan perumusan yang sama, dalam skala amat lokal, Φ dapat menyebabkan kurvatur tambahan yang menjadi penyebab pelensaan gravitasional, seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (35).

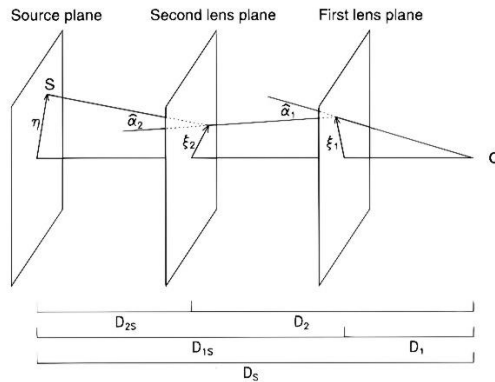
Estimasi jarak adalah masalah pelik dalam kosmologi. Dikarenakan alam semesta terus memuai, jarak antar-galaksi membesar. Jadi, jarak antar-galaksi merupakan fungsi waktu yang Persamaan (43) titipkan pada faktor skala. Lebih dari itu, seperti didiskusikan setelah Persamaan (12) jarak bisa merupakan fungsi sebaran massa yang elemen jaraknya tertulis dalam Persamaan (43). Perkaranya, kita tidak punya rumusan bagaimana massa tersebar, atau bentuk rinci $\Phi(r)$ di semua lokasi. Untuk itulah dilakukan kombinasi simulasi evolusi struktur skala besar dan simulasi propagasi cahaya yang dikerjakan dengan teknik pelensaan gravitasi multi-bidang. Cara alternatif yang semi analitik adalah dengan cara membagi seluruh

massa dalam semesta dalam bentuk bongkahan-bongkahan dan menyebarkannya secara hampir merata (Dyer & Roeder, 1981), atau dalam potensial dan sebaran massa secara hierarkis (Futamase & Sasaki, 1989), atau dengan membentuk isi semesta seperti keju Swiss (*Swiss cheese*) yang tersusun atas daerah padat dan lubang-lubang (Holz & Wald, 1998).

3.2.1 Metode Pelensaan Multi-bidang

Pada prinsipnya yang dilakukan adalah mempropagasikan berkas cahaya (*ray tracing*) dari sumber pengamat dalam semesta yang strukturnya disimulasikan dan menghitung dampak pembelokan cahaya akibat distribusi massa yang inhomogen. Metode ini berisi lima langkah utama:

- a. Penyiapan struktur skala besar dengan simulasi numerik yang dibahas pada Subbab 2.2.2 yang mengevolusikan struktur dalam kosmologi pilihan dari redshift tinggi, biasanya $z \sim 1000$ untuk dapat menyesuaikan dengan profil bibit dari CMB, hingga saat ini $z=0$.
- b. Membagi kedalaman semesta dalam kotak-kotak dengan *comoving size* yang sama.
- c. Memproyeksikan massa dalam kotak pada dinding-dinding kotak yang tegak lurus terhadap garis pandang (*line of sight*) yang searah pertambahan z .
- d. Membagi dinding-dinding tadi dalam pixel-pixel dan menghitung densitas pada tiap pixel. Densitas area yang dilalui lintasan foton akan menjadi masukan untuk Φ pada persamaan lensa dan jarak.
- e. Menjalankan proses lensa gravitasi pada seberkas cahaya yang tersusun atas titik-titik cahaya dari suatu lokasi sumber, misal pada $z=5$, dan menghitung besar efek lensa gravitasi yang dialami lintasan foton pada setiap dinding, dan menjumlahkannya hingga mencapai pengamat.

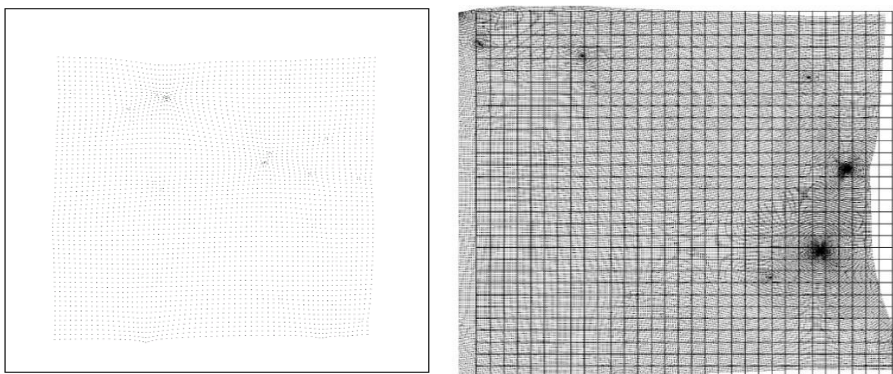


Gambar 21 Skema pelensaan multi-bidang. Dalam pekerjaan nyata, jumlah bidang mencapai puluhan. [Sumber: Premadi et al, 1998]

Konfigurasi skematis pelensaan multi-bidang ditunjukkan pada Gambar 21. Secara sekuensial posisi berkas foton pada satu dinding menjadi sumber untuk dinding berikutnya.

Pekerjaan *ray tracing* ini dilakukan ratusan kali untuk masing-masing model kosmologi yang dicoba dengan menggunakan realisasi simulasi yang berbeda yang dipilih secara acak. Ini dilakukan untuk memastikan tidak ada korelasi yang dimunculkan oleh komputer secara sistematis.

Penghitungan konvergensi dan shear dilakukan pada setiap bidang, sehingga perubahan konfigurasi titik-titik berkas cahaya dapat dilihat dari bidang ke bidang. Konfigurasi titik-titik yang awalnya tersebar rapi menjadi berubah karena pelensaan. Gambar 22 menunjukkan contoh dampak pelensaan lemah dan pelensaan kuat.

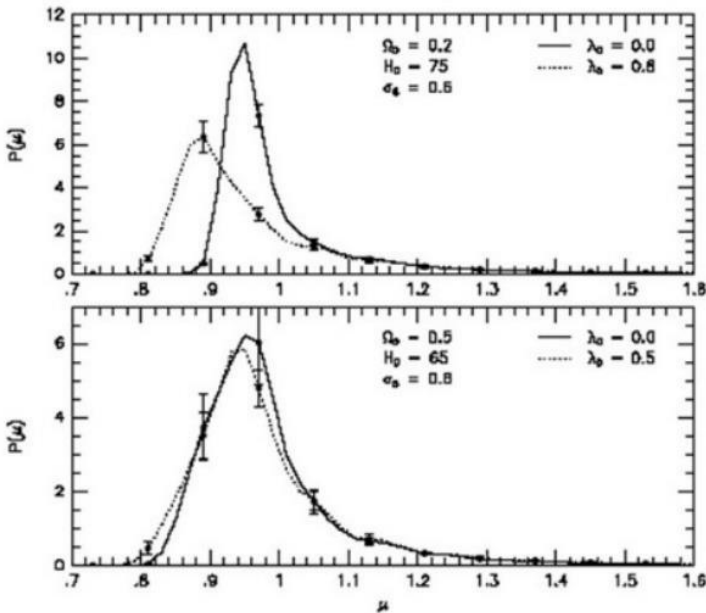


Gambar 22 Perubahan konfigurasi titik-titik cahaya pada berkas cahaya akibat pelensaan. Kiri: pelensaan lemah, kanan pelensaan kuat. [Sumber: Premadi et al, 1998]

3.2.2 Contoh Luaran Simulasi Pelensaan Gravitasi Kosmologis oleh Struktur Skala Besar

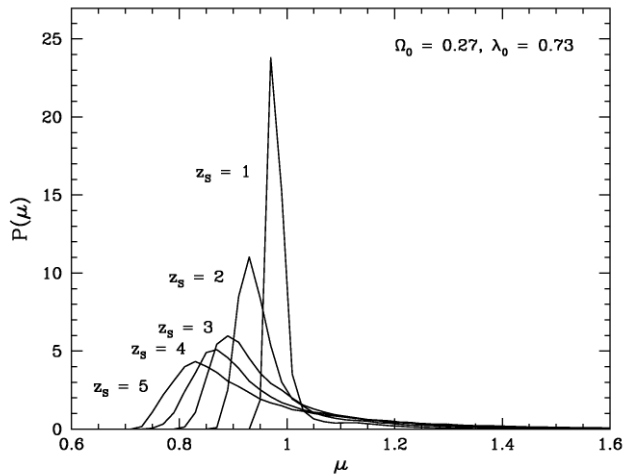
Berikut ini ditunjukkan tiga dari berbagai jenis luaran dari studi pelensaan gravitasi kosmik akibat struktur skala besar yang evolusinya disimulasikan.

- a. Distribusi efek lensa gravitasi, untuk berbagai model kosmologi. Dampak variasi model kosmologi pada fitur pelensaan kosmik terlihat, dalam hal ini distribusi penguatan cahaya, μ , ditunjukkan pada Gambar 23.

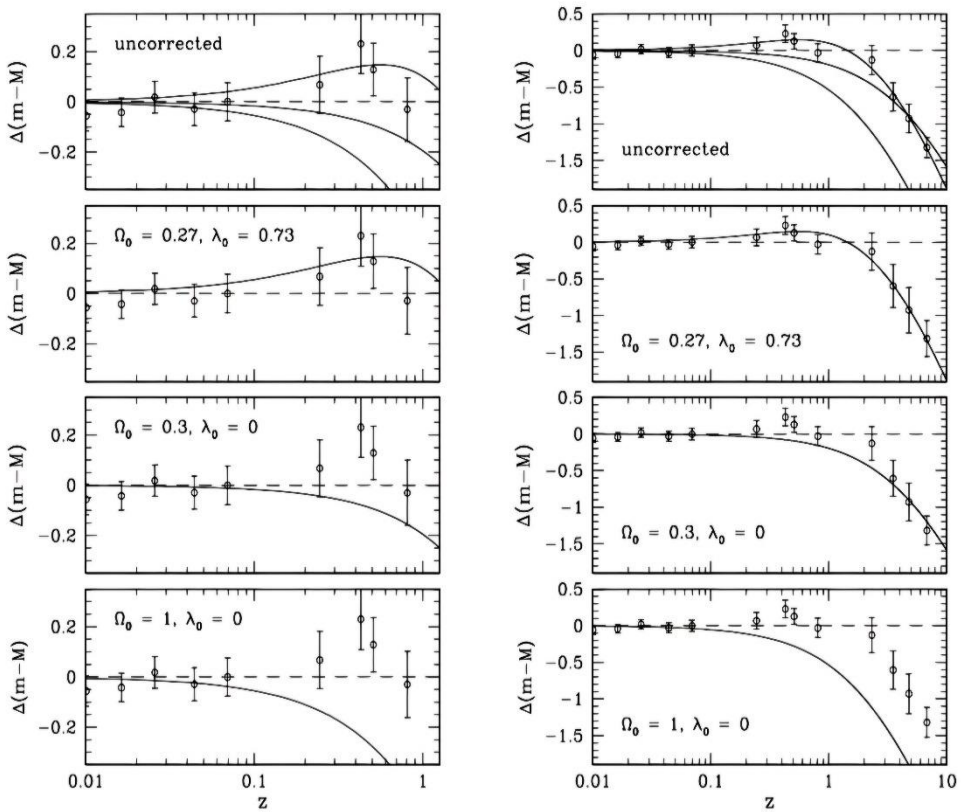


Gambar 23 Contoh distribusi penguatan cahaya akibat pelensaan dengan variasi kosmologi. [Sumber: Premadi et al, 2001]

- b. Dampak pelensaan gravitasi kosmologis pada estimasi jarak supernova dengan memperhatikan distribusi (de)magnifikasi cahaya untuk berbagai jarak supernova dan dalam tiga variasi model kosmologi. Gambar 24 menunjukkan bahwa demagnifikasi yang semakin *probable* untuk supernova yang jauh.



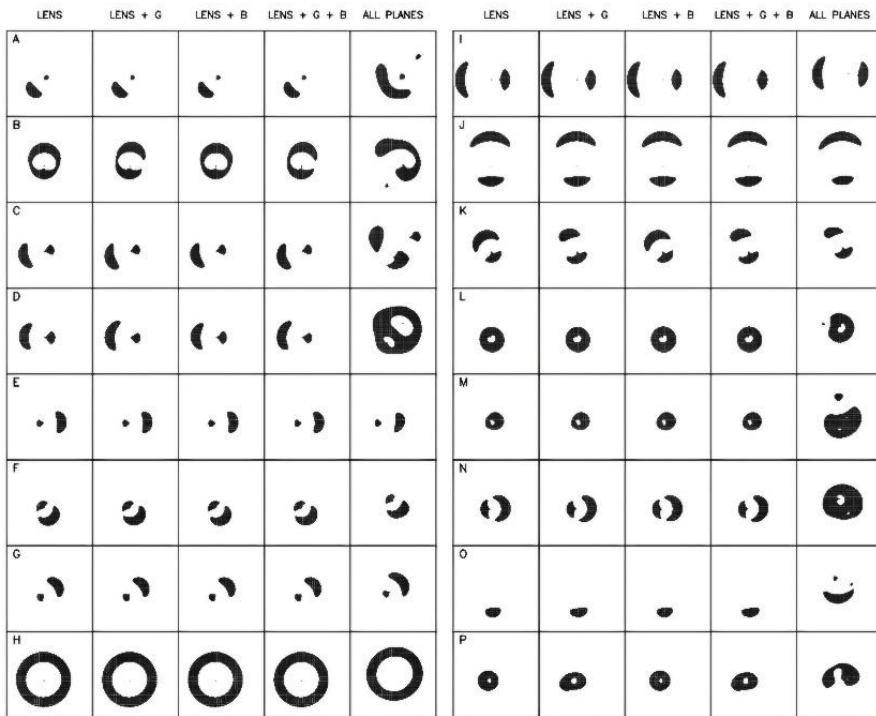
Gambar 24 Distribusi probabilitas penguatan cahaya untuk supernova pada posisi $z=1$ hingga 5 dalam kosmologi dengan konstanta kosmologi. [Sumber: Premadi & Martel, 2005]



Gambar 25 Kiri: Dampak pelensaan gravitasi pada data modulus jarak supernova dekat untuk berbagai model kosmologi; kanan: seperti panel kiri ditambah *mock* data supernova jauh. [Sumber: Martel & Premadi, 2008]

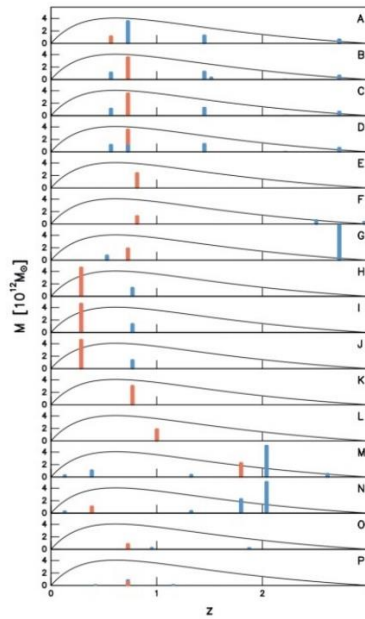
Gambar 25 menunjukkan koreksi untuk modulus jarak akibat pelensaan semakin besar dengan penambahan jarak sumber, dan signifikan untuk supernova yang jauh. Hasil simulasi juga menunjukkan perhitungan modulus jarak model kosmologi dengan konstanta kosmologi (atau disebut energi gelap sekarang) lebih sesuai dengan prediksi simulasi.

- c. Mengenali distribusi lensa dan lingkungannya. Apabila sumber cahaya berada amat jauh dari pengamat, maka sangat mungkin cahaya mengalami pelensaan beberapa kali dengan kekuatan yang berbeda-beda. Dipilih 16 kasus lensa kuat yang ditelusuri balik untuk mengetahui lensa utama, lensa tambahan, dan juga fitur densitas di lingkungan lensa utama. Gambar 26 menunjukkan dampak dari setiap tahapan pelensaan untuk masing-masing kasus. Gambar 27 menunjukkan posisi lensa utama dan lensa-lensa tambahan sepanjang lintasan cahaya (sepanjang sumbu *redshift*) dengan kurva probabilitas pelensaan sebagai fungsi *redshift* sumber. Kita lihat bahwa bisa saja ada galaksi masif pada lintasan (kasus G), tetapi karena jaraknya terlalu dekat dengan sumber, galaksi ini tidak efektif melensakan. Sementara pada kasus H terlihat galaksi masif berada pada z dekat puncak probabilitas pelensaan yang mengakibatkan galaksi ini amat dominan dalam pelensaan.

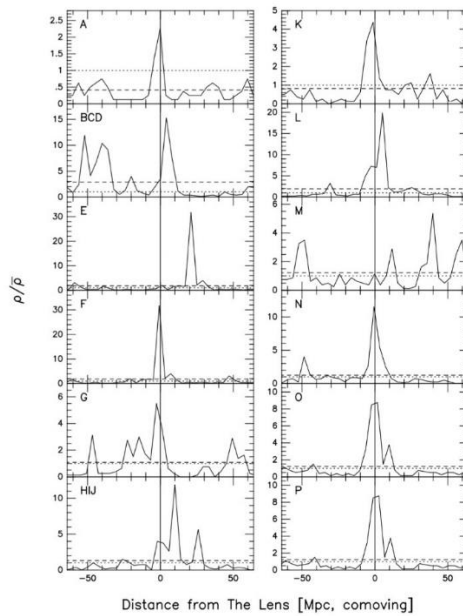


Gambar 26 Citra-citra untuk kasus A-P dengan uraian peran lensa utama, lensa pendukung, dan lingkungan. [Sumber: Premadi & Martel, 2004]

Gambar 28 menunjukkan distribusi massa di sekitar lensa utama yang mengindikasikan lensa berada dalam daerah dengan densitas lebih tinggi daripada rata-rata. Hasil ini menjadi input penting dalam penghalusan skema pertumbuhan struktur secara hierarkis.



Gambar 27 Posisi dan kekuatan lensa penghasil kasus A-P. [Sumber: Premadi & Martel, 2004]



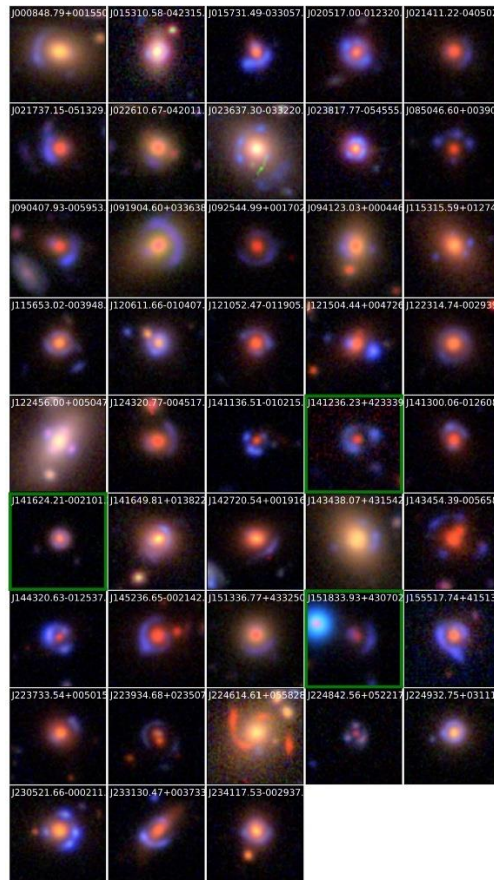
Gambar 28 Distribusi densitas di sekitar lensa utama. [Sumber: Premadi & Martel, 2004]

3.3 Studi Hasil Pengamatan Lensa Gravitasi

Dalam dua Subsubbab berikut ini ditunjukkan contoh pekerjaan penelitian pelensaan gravitasi yang memanfaatkan data pengamatan terkini. Secara umum pekerjaan ini dibagi menjadi dua golongan: survei dan studi rinci kasus lensa individual. Objektif pekerjaan survei antara lain adalah identifikasi kasus-kasus pelensaan baru, statistik profil umum lensa seperti kekuatan lensa, lokasi sumber dan lensa. Studi rinci kasus individual sering merupakan tindak lanjut dari temuan kasus lensa dalam survei. Pemodelan lensa dipelajari dengan rinci untuk mendapatkan profil densitas lensanya. Memanfaatkan studi-studi kasus individual seperti ini membantu mengkonstruksi profil gumpalan-gumpalan massa besar mulai dari seukuran galaksi (beberapa puluh kpc) hingga gugus galaksi (beberapa Mpc). Dikarenakan sebagian, nampaknya mayoritas, dari massa ini adalah materi gelap, maka dengan cara ini kita mengonstruksi distribusi materi gelap dalam semesta untuk rentang volume dan waktu yang cukup untuk merekonstruksi evolusi struktur. Cara ini bukan hanya unik, tapi belum tergantikan sampai kita temukan cara untuk mengindera materi gelap secara ekstensif sekaligus detail.

3.3.1 Survei Lensa Gravitasi

Survey of Gravitationally lensed Objects in HSC-SSP Imaging using CNN (SuGOHI) adalah upaya menemukan kasus pelensaan gravitasi dari survei galaksi menggunakan teleskop Subaru. Menggunakan metode *Convolutional Neural Network* dari jutaan sample galaksi dapat diidentifikasi calon kasus lensa dari kategori meyakinkan hingga kategori mungkin. Gambar 29 memperlihatkan contoh hasil identifikasi dengan teknik CNN tersebut (Jaelani et al (2023)). Pekerjaan tindak lanjut berupa pemeriksaan rinci untuk masing-masing kasus lensa yang meyakinkan untuk memodelkan profil densitas lensa dan menyusunnya untuk keperluan studi evolusi struktur. Sedangkan untuk kasus-kasus yang dengan keyakinan yang lebih rendah, pemeriksaan ada pada analisis lensa dan juga analisis struktur galaksinya.



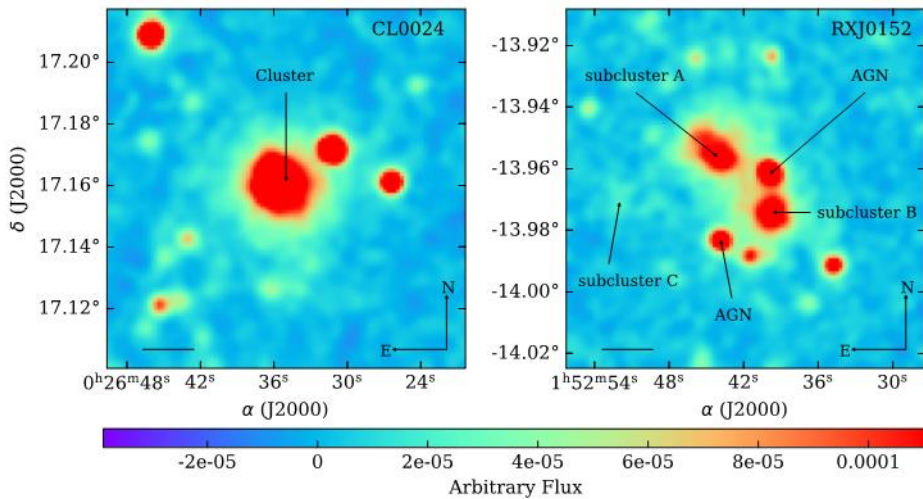
Gambar 29 Contoh kasus-kasus lensa gravitasi yang ditemukan dalam survei galaksi Subaru HSC-SSP [Sumber: Jaelani et al, 2023]

3.3.2 Contoh Studi Kasus Lensa Gravitasi

Ada semakin banyak studi kasus individual pelensaan gravitasi. Dalam dua dekade terkini, studi kasus seperti ini, baik pelensaan galaksi oleh galaksi, atau pelensaan galaksi oleh gugus galaksi, dilaksanakan dengan memanfaatkan pengamatan multi-frekuensi. Untuk lensa berupa gugus galaksi cara ini amat didorong karena gugus galaksi berisi sejumlah besar galaksi yang umumnya diamati pada frekuensi optik dan melimpahnya gas panas yang diamati pada frekuensi sinar-X.

Berikut ini adalah contoh studi dua gugus galaksi yang dianalisis pada sinar-X untuk mengetahui sebaran gas panas dan juga cakupan potensial gravitasi yang menyimpan gas panas, dan pada cahaya optik untuk mengestimasi umur bintang serta laju pembentukan bintang dalam galaksi-

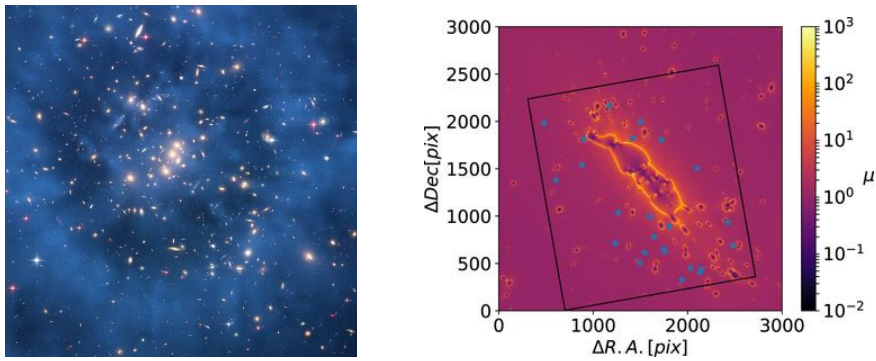
galaksi anggotanya. Estimasi ini menginformasikan ketersediaan materi pembentuk bintang dan rentang umur galaksi. Studi independen menganalisis lensa gravitasi yang disebabkan oleh gugus-gugus ini. Kombinasi semua studi ini saling melengkapi dalam memberikan gambaran tentang distribusi potensial gravitasi kedua gugus ini, termasuk distribusi massa yang tak tampak. Gambar 30, 31, dan 32 mengilustrasikan rangkuman studi tersebut.



Gambar 30 Distribusi intensitas sinar-X dari gugus galaksi CL0024 (kiri) dan RXJ0152 (kanan). [Sumber: Premadi et al 2022]



Gambar 31 Tampilan pada jendela optik gugus galaksi CL0024 (kiri) dan RXJ0152 (kanan). [Sumber: NASA: Hubble Space Telescope]



Gambar 32 Distribusi massa, termasuk massa gelap, berdasarkan analisis pelensaan gravitasi. [Sumber: Acebron etal, 2019]

3.4 Studi Lanjutan: Pertanyaan-Pertanyaan Baru

Pelensaan gravitasi membutuhkan massa yang besar dan kompak. Umumnya ini dipenuhi oleh galaksi dengan bagian pusat yang masif dan gugus galaksi dengan profil massa yang tajam ke pusat. Fakta pengamatan, dan juga dari simulasi, mengindikasikan bahwa galaksi seperti ini cenderung berada dalam lingkungan dengan densitas lebih tinggi daripada rata-rata. Pertanyaannya adalah seberapa cepat proses aglomerasi massa dalam pembentukan galaksi sehingga terkumpul massa besar dan kompak pada bagian pusat. Pertanyaan yang mirip diajukan oleh para peneliti lubang hitam supermasif di pusat galaksi-galaksi dengan orde massa antara (10^6 - 10^9) massa Matahari (Kormendy & Ho, 2018 dan Greene, Strader, & Ho, 2020). Bagaimana mungkin massa sebesar itu terkumpul dalam waktu relatif singkat dibandingkan dengan waktu evolusi bintang. Pemeriksaan lingkungan di sekitar galaksi pelensa dan di sekitar galaksi berinti aktif sebagai fungsi dari *redshift* akan membuka jalan baru untuk menjawab pertanyaan bersama di atas. Lingkungan yang dimaksud dapat berupa rapat jumlah galaksi terdekat, dan profil massa gas dingin maupun panas di daerah yang sama.

Sedang disiapkan pekerjaan pemeriksaan detail galaksi-galaksi anggota gugus-gugus galaksi pelensa untuk dapat memperkirakan umur galaksi-galaksi anggota. Dengan demikian studi profil massa lingkungan dapat dilengkapi dengan umur galaksi yang berada dalam lingkungan tersebut.

Sementara itu, pemeriksaan rinci morfologi galaksi-galaksi pelensa membantu memperinci studi evolusi internal galaksi. Walaupun pelensaan

gravitasi mendistorsi tampilan morfologi galaksi, tetapi hal ini dapat ditanggulangi dengan penghalusan model lensa. Hal terpenting adalah lebih banyak galaksi menjadi terlihat karena penguatan cahaya oleh pelensaan. Dengan ini statistik membaik, dan metode *machine learning* juga semakin dapat diandalkan. Survei kasus lensa gravitasi banyak dilakukan untuk keperluan ini, antara lain oleh Jaelani et al (2023) pada panjang gelombang optik, dan Gao et al (2024) pada inframerah.

Pelensaan gravitasi kosmologis oleh struktur skala besar pada umumnya lemah, tetapi secara kumulatif tidak dapat diabaikan, seperti ditunjukkan pada Subbab 3.2.2. Studi ini penting untuk ditindaklanjuti karena menawarkan cara untuk mengestimasi penguatan cahaya latar belakang yang perlu diidentifikasi untuk mengetahui kuat cahaya yang sesungguhnya dari sumber jauh. Dengan demikian sejarah fungsi luminositas dapat direkonstruksi dengan lebih saksama. Belum lama ini sektor pekerjaan ini dinilai penting karena dapat memberikan gambaran emisi cahaya kuno yang berasosiasi dengan era pembentukan galaksi. Pengamatan utamanya dilakukan pada rentang panjang gelombang inframerah jauh (Hsu et al, 2024). Selain untuk kepentingan studi evolusi struktur skala besar, perbaikan kualitas simulasi lensa gravitasi kosmologis akan membantu interpretasi jarak supernova jauh yang semakin banyak datanya, dan semakin diandalkan untuk penentuan fitur global kosmik, seperti profil energi gelap.

4 PENUTUP

Bab ini disebut Bab Penutup, padahal sebetulnya ini adalah bab yang diharapkan membuka pintu untuk merenung, bertanya, belajar lebih lanjut, dan bekerja sama dalam melangkah maju. Upaya ini menyangkut aspek praktis maupun filosofis dalam konstruksi pengetahuan.

Telah digambarkan dengan singkat bagaimana mempelajari evolusi alam semesta memerlukan beberapa elemen yang harus didayagunakan secara integral: pengetahuan kokoh tentang fondasi fisiknya, pengamatan yang menghasilkan data berkualitas (termasuk bagaimana menilai dan mengoreksi data), dan kemampuan komputasional. Pelensaan gravitasi memenuhi ketiga syarat ini. Terlebih karena pelensaan gravitasi kuat adalah fenomena kosmologis, maka hampir semua parameter pelensaan mengandung informasi kosmologi. Penggalan di sektor ini ditunjukkan berpotensi untuk memeriksa profil global kosmos, sambil juga memberikan *snapshots* fitur struktur skala besar penyebab lensa yang dapat disusun untuk memberikan gambaran detail evolusi struktur.

Parameter-parameter yang muncul dalam persamaan model dinamika semesta turun dari salah satu “*first principle*” fisika, dalam hal ini Teori Relativitas Umum, yakni berupa relasi fundamental antara besaran-besaran fisis. Perkaranya, parameter-parameter ini belum tentu merupakan besaran yang dapat diukur (*measurable*), bahkan dalam kosmologi belum tentu dapat diamati (*observable*). Kosmologi menjadi *inverse problem at the limit*, karena semua objek studinya tak bisa kita dekati dan atur untuk memenuhi keingintahuan kita. Dorongan untuk memunculkan ide dilandasi oleh pengetahuan fisika yang telah kita uji bekerja baik di lingkungan Tata Surya. Untuk menghidupkan ide, perlu dicari cara untuk memeriksanya, dan dari situ diupayakan pengembangannya. Walaupun jelas tidak mudah, pemikiran yang serius dan *genuine* membukakan jalan secara alami, hampir otomatis, dan disadari tidak bisa linier. Hal yang diperlukan adalah kemampuan untuk bertanya dengan jernih: menyiapkan pertanyaan yang *well-motivated* dan *well-phrased* adalah langkah pertama yang *crucial*. Pengalaman menunjukkan bahwa gagasan cemerlang berangkat dari pertanyaan yang jernih. Pelajaran terpenting dari kosmologi: semesta menyajikan realita sebaik pertanyaan yang kita ajukan padanya.

Dalam seabad terakhir umat manusia mencuatkan pengetahuan tentang semesta yang bisa kita uji dan perbaiki sebagaimana layaknya *proper science*, yang menghasilkan pertanyaan-pertanyaan baru, yang mengoreksi posisi kita yang jelas tidak sentral dalam semesta, yang menjadikan pertanyaan-pertanyaan *archaic* tentang eksistensi manusia dan relasinya dengan alam menjadi pemikiran filosofis yang dalam karena menuruti aturan logika yang konkret dan dipagari oleh bukti pengamatan. Semua ini, praktis kita lakukan sambil duduk saja di Bumi, bulir *miniscule*, *the Pale Blue Dot*, kata Carl Sagan, di semesta yang maha luas dan tua ini. Betapa luar biasa kekuatan imajinasi dan refleksi yang terdidik.

Pertanyaan yang jernih menginspirasi strategi untuk menjawabnya, mendetailkan langkah dan data yang diperlukan, dan teknologi yang perlu mendukung. Kita telah lihat bagaimana ambisi manusia memahami alam telah mendorong hadirnya teknologi baru untuk mencapainya. Kita apresiasi juga bahwa banyak teknologi canggih, sebagai perangkat keras maupun lunak, yang disiapkan untuk keperluan astronomi memberikan manfaat luas dalam kehidupan; suatu *spin-off* yang bermaslahat yang juga mengingatkan bahwa kita manusiis selalu menyadari interrelasi dalam kebutuhan dan pemenuhannya. “Menyaksikan” bagaimana kompleksitas tumbuh selagi struktur berevolusi, kita terus membuka diri terhadap ketidaktahuan dan ketidakpastian; tidak untuk ditakuti, tetapi untuk menatanya dalam pikiran dan dalam berstrategi. Fenomena serupa kita saksikan dalam sistem manusia dan lingkungan hidup di Bumi.

Di titik ini saya ingin diingatkan mengapa dan untuk apa kita bertanya dan bekerja keras untuk ini semua? Apa impak pada kebaikan hidup sehari-hari kita dengan bercermin pada semesta, dengan mengetahui berapa umurnya, bagaimana bintang dan galaksi terbentuk dan memperkaya semesta, di mana kita dalam ruang dan waktu semesta ini? Apa peran manusia dalam semesta? Dan, tergeraklah kita ketika mengetahui bahwasanya seluruh unsur kimia yang membentuk kehidupan kita suatu saat di masa yang amat lampau disiapkan oleh bintang-bintang nan jauh di sana lewat reaksi termonuklir di perutnya? Bagaimana ini semua bisa menajamkan kemampuan berpikir rasional dan menghaluskan nurani kita? Saya tak mampu dan tak ingin menjawabnya sendirian. Saya mohon dibantu.

5 UCAPAN TERIMA KASIH

Banyak yang mengantar saya hingga mencapai jenjang karier ini dan masih setia menemani dan mendukung saya dalam perjuangan yang terus berlanjut. Kepada mereka semua saya berhutang budi dan haturkan terima kasih sedalam-dalamnya dengan iringan doa untuk kebahagiaan yang melampaui batas semesta. Dikarenakan berbagai keterbatasan, sungguh ada jauh lebih banyak nama yang mestinya ditulis di sini. Saya memohon maaf atas ketidakbaikan saya ini.

Dasar pengetahuan dan minat pada sains saya peroleh dari guru-guru SMA saya: Sr. Marietta dan (alm) Bapak Ibnu Sutopo; pada jenjang perguruan tinggi, guru-guru saya semakin banyak: (alm) Prof. Winardi Sutantyo, (alm) Dr. Jorga Ibrahim, Prof. Bambang Hidayat, Dr. Iratius Radiman, Dr. Moedji Raharto, (alm) Prof. Tjia May On, (alm) Dr. Hans Wospakrik, (alm) Prof. Djoni Dawanas, (alm) Prof. Suryadi Siregar, (alm) Prof. Suhardja Wiramihardja; pada jenjang doktoral dan seterusnya guru-guru saya betul-betul menanamkan jiwa saintis dan pengetahuan yang berakar dalam dan terus berkembang: Prof. Richard Matzner, Prof. Hugo Martel, (alm) Prof. Cécile DeWitt-Morette, Prof. Derek Wills, Prof. Toshifumi Futamase, Prof. Edward van den Heuvel, Prof. Ethan Vishniac, (alm) Prof. Steven Weinberg, (alm) Prof. George Sudarshan, Prof. Kenji Tomita, Prof. Peter Schneider, (alm) Prof. Robert Rutten, Prof. Matthew Colless, Prof. Rachel Webster, Prof. Joel Primack, Prof. Masahiro Takada, Prof. Daniel Holz, dan Prof. Eichiro Komatsu. Sebagai akademisi, tidak cukup hanya berpengetahuan dalam topik yang diminati, tetapi juga perlu pengayaan, perluasan lintas disiplin, pengembangan institusi, yang semuanya memerlukan berjejaring dalam relasi yang *genuine*. Dalam sektor ini saya amat ditumbuhkan oleh: Prof. George Miley, Dr. Karel van der Hucht, (alm) Dr. Hans Nieuwenhuijzen, Prof. René Breton, Prof. Anna Scaife, Dr. Jan Visser, Prof. Pedro Russo, Prof. Jocelyn Bell-Burnell, Prof. Shin Minishige, Prof. Paul Ho, Dr. Kevin Govender, (alm) Dr. Carolina Ödman-Govender, Prof. Carmen Molina-París, Dr. William Grassie, dan Prof. David Christian. Lebih dekat tentunya para guru dan sahabat akademik di Indonesia, teman-teman yang percaya dan mendukung mimpi-mimpi saya, dan tentu saja para sahabat sejawat di Astronomi ITB: Dr. Ir. Kusmayanto Kadiman, Prof. Satryo Brojonegoro, (alm) Prof. Subroto, Prof. Terry Mart, Prof. Cynthia Radiman, Prof. Dessy

Natalia, Prof. Indra Djati Sidi, Prof. Andi Mahyuddin, Prof. Alexander Iskandar, Prof. Iwan Pranoto, Prof. Freddy P. Zen, Dr. Karlina Supelli, Prof. Damayanti Buchori, Prof. Sulistyowati Irianto, Prof. Melani Budianta, Prof. Riris Sarumpaet Toha, Dr. Ninok Leksono, Dr. Zainal Bagir, Dr. Hilmar Farid, Dr. Riama M. Sihombing, Prof. Immaculata Iwo, Prof. Udjiana Pasaribu, Ibu Yani Panigoro, Bapak Raja Manahara Hutaauruk, rekan-rekan Ganesha83, rekan-rekan UNawe Internasional dan UNawe Indonesia, rekan-rekan Jejaring Observatorium dan Planetarium Indonesia; Prof. Dhani Herdiwijaya, Prof. Taufiq Hidayat, Dr. Mahasena Putra, Dr. Hesti R. T. Wulandari, Dr. Kiki Vierdayanti, Dr. Budi Dermawan, Dr. Hakim L. Malasan, Dr. Aprilia, Dr. M. Iqbal Arifyanto, Dr. Lucky Puspitarini, Dr. Anton T. Jaelani, Dr. M. Irfan Hakim, Dr. Yayan Sugianto, Dr. Endang Sugiartini, Dr. Chatief Kunjaya, Ferry Simatupang, M.Si., Evan I. Akbar, M.Si., Dr. Fargiza A. M. Mulki, (alm) Dr. Dading H. Nugroho. Dengan tim Observatorium Bosscha saya merasa tumbuh berkembang bersama dengan cinta tak terbatas: para astronom utama: Yatny Yulianty, M.Si., Muhammad Yusuf, S.Si., Mochamad Irfan, M.Si., Agus T. P. Jatmiko, M.Si., Denny Mandey, M.Si., Luthfiandari, M.Si., Ajeng Trihandini, S.Si., Dhimaz G. Ramadhan, M.Si., D. Yoshafetri Yuna, M.Si., Bapak Agus Setiawan, Bapak Maman Sulaeman, Bapak Rudi Hamdani, Bapak Lili Mulyana, Bapak Ilit, Bapak Iwa Sutisna, (alm) Bapak Yaya, dan seluruh tim Observatorium yang luar biasa. Di Program Studi Astronomi, Ibu Abdhiany Murtiawati -lah yang membereskan urusan kepegawaian saya, bahkan sering tanpa sepengetahuan saya, dengan ketulusan yang membuat saya ingin belajar dari beliau. Di FMIPA Dr. Hanni Garminia sebagai pribadi yang luhur, sebagai Wakil Dekan Sumber Daya yang dedikasinya jauh melampaui tugasnya, dengan seluruh tim yang amat sigap dan baik hati menguruskan semuanya. Kepada Dekan FMIPA dan seluruh jajaran, Senat Fakultas MIPA, Senat Akademik ITB, Forum Guru Besar ITB, Rektor ITB dan seluruh jajarannya, saya amat berterima kasih. Di antara para sahabat saya semenjak kecil, di bangku sekolah, dalam dunia profesi yang beragam, yang istimewa mendampingi saya: Ir. Cara Mariko Pitono-Rusdi, drg. Maya Lewerissa SpP., Dra. Fitri Untari Dewi, Drs. Widya Sawitar, dr. Merianawaty Vina Ria, drg. Martina Pranasari, SpA., Dr. Lulu L. Fitri, Dr. Ir. Teti Argo, Ade Djunainah, MS, Dr. Asclepias R. Indriyanto, Ir. Relita Irawati, Dr. Ciska M. Tobing, dan Caecilia Obbard. Saya berhutang budi dan nyawa pada para dokter saya dan pendukung ALS Indonesia: dr. Reggy Panggabean, SpS., dr. Sheila Agustini,

SpS., Mala Mukti, SH., Prof. Loh Ee Chin, Prof. Nortina Syahrizaila, Alice Sutjipto, (alm) Bintarti Soewondo, dr. Jovita Melania SpKFR., dr, Chandra Mulyono, SpS., Meli Luthfie, Andika B. Priambodo, SSi., dan Sr. Ellys. Sahabat jiwa saya, Linda Hoemar Abidin menemani saya di'mana'pun dan memastikan jiwa raga saya utuh dan berbahagia. Bersama dengan Linda, Damayanti Buchori, Sulistyowati Irianto, Melani Budianta, kami menyalakan obor cinta untuk mendampingi generasi muda menyiapkan masa depan: TerbitlahTerang.ID. Keluarga saya adalah yang senantiasa ada mendukung dan mendoakan saya: Ibu dan (alm) Bapak Premadi; adik-adik: Dwiyana, Triyana, Estherlita; suami: Yudi Soeharyadi; mertua: Ibu dan (alm) Bapak Sutjipto Wangsadibrata; para keponakan; dan para orang tua yang 'mengadopsi' dan menjadi teladan bagi saya: (alm) Ibu Darmasti Soedji, (alm) Charlotte dan (alm) Royal Thompson, (alm) Karen & (alm) Richard Mullineaux, dan (alm) Lillian Rachlin, MD.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrams, N. & Primack, J., 2006, "View from the Center of the Universe", Riverhead Books, Penguin Group
- Acebron, A., et al, 2019, *The Astrophysical Journal*, **874**(2), 132
- APOD: Astronomy Picture of the Day: 15 Maret 2000, <https://apod.nasa.gov/apod/ap000315.html>
- Bardeen, J., et al, 1986, *Astrophysical Journal*, **304**, 15
- Betoule, M., et al, 2014, *Astronomy & Astrophysics*, **568**, A22
- Bunn, E., et al, 1995, *Astrophysical Journal*, **441**, L9
- Dressler, A., 1980, *Astrophysical Journal*, **236**, 351
- Driver, S. & GAMA Team, 2020, ICRAR, <https://www.icrar.org/conferences/aus-eso-ii/>
- Dyer, C. & Roeder, R., 1981, *General Relativity and Gravitation*, **13**(12), 1157
- Fixsen, D., et al, 1996, *Astrophysical Journal*, **473**, 576
- Futamase, T. & Sasaki, M., 1989, *Physical Review D*(15), **40**(8), 2502
- Greene, J., Strader, J., & Ho, L., 2020, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*
- Hlozek, et al, 2012, *Astrophysical Journal*, **749**(1), 90, 10
- Hsu, Q-N., et al, 2024, *Astrophysical Journal Letters*, **964**:L32, 7
- Illustris: <https://www.illustris-project.org/>
- Jaelani, A., et al, 2023, (submitted) <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv231207333J/abstract>
- Kormendy, J. & Ho, L., 2018, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*
LBNL: <https://www.physics.lbl.gov/cosmo/>
- Martel, H., Premadi, P., & Matzner, R., 1998, *Astrophysical Journal*, **497**, 512
- Martel, H. & Premadi, P., 2008, *Astrophysical Journal*, **673**(2), 657
- Nature: <https://www.nature.com/news/early-universe-graphic-jpg-7.10784?article=1.13076>
- Premadi, P., Martel, H., & Matzner, R., 1998, *Astrophysical Journal*, **493**, 10
- Premadi, P., Martel, H., Matzner, R., & Futamase, T., 2001, *Astrophysical Journal Suppl.* **135**, 7
- Premadi, P. & Martel, H., 2004, *Astrophysical Journal*, **611**, 1, 1-11

- Premadi, P. & Martel, H., 2005, Proceedings of the 22nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Stanford University 2004
- Premadi, P. W., Nugroho, D. H., and Jaelani, A. T., 2021, Journal of Mathematics and Fundamental Sciences, Vol. 53, No. 3
- Rodighiero, G., et al, 2023, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **518**, L19
- Schneider, P., 2015, “Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction”, 2nd Ed., Springer
- Schneider, P., Ehlers, J., & Falco, E., 1992., “Gravitational Lens”, Springer
- Schutz, B., 2009, “A First Course in General Relativity”, Cambridge Uni
- Smoot, G., et al, 1992, Astrophysical Journal, **396**, L1
- Tegmark, M., et al, 2002, Astrophysical Journal, **571**(1), p191
- Tytler, D., et al, 2000, Phys. Rep., **333**, p409
- Wambsganss, J., 1998, “Gravitational Lensing”, Living Review in Relativity, Publication of MPI for Gravitational Physics
- Weinberg, S., 2008, “Cosmology”, Oxford University Press

CURRICULUM VITAE



Nama : Premana Wardayanti Premadi
Tempat/tgl lahir : Surabaya / 13 Juli 1964
Kel. Keahlian : Astronomi
Alamat Kantor : ITB, Ganesha 10, Bandung 40132
Nama Suami : Dr. Yudi Soeharyadi

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1983: SMA Tarakanita 1, Jakarta
1988: Sarjana Sains (Dra), Astronomi, Institut Teknologi Bandung
1996: Doctor of Philosophy, Fisika, University of Texas at Austin

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1988 – 1989: Asisten Dosen, Jurusan Astronomi & Jurusan Fisika
1990 – sekarang: Dosen Jurusan/Program Studi Astronomi
2018 – 2023: Kepala Observatorium Bosscha

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1990 - Januari: CPNS
1990 - November: PNS III/A
2001 - Juli: III/B
2004 - April: III/C
2007 - April: III/D
2011 - Oktober: IV/A
2013 - Oktober: IV/B
2024 - Februari: IV/C

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

2001: Asisten Ahli
2003: Lektor

2011: Lektor Kepala

2023: Guru Besar

V. KEGIATAN PENELITIAN

Indonesia: Research & Education Project Grants

1. LPPM-ITB: 2005, 2010, 2012, 2016
2. P3MI-FMIPA-ITB: 2017, 2018, 2020
3. WCU-ITB: with Australian National University: 2018, 2019
4. P2MI-FMIPA-ITB: 2021
5. PPMI-FMIPA-ITB: 2022, 2023, 2024
6. DIPI: 2017-2019

International: Research & Education Project Grants

1. Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Postdoctoral Research Grant, 1997-1999
2. John Templeton Foundation, via Metanexus Institute, Local Society Initiative, "A constructive dialogue between science, religion, and culture", 2005-2007
3. International Astronomical Union - Office of Astronomy for Development Grant: "Community Development in the Surrounding Area of National Observatory Project in Timor", 2016
4. DIPI - RCUK joint Newton Fund, with Manchester University, 2017-2019
5. International Astronomical Union - Office of Astronomy for Development, 2021
6. International Astronomical Union - Office of Astronomy for Education, 2024

VI. PUBLIKASI

A. Refereed journals:

1. Matzner, R., Huq, M., Botero, A., Choi, D.I., Kask, U., Lara, J., Liebling, S., Neilsen, D., Premadi, P., Shoemaker, D., 1997, "Analysis of 'gauge modes' in linearized relativity", *Classical and Quantum Gravity*, 14, L21
2. Premadi, P., Martel, H., & Matzner, R., 1998, *Astrophysical Journal*, 493, 10, "Light Propagation in Inhomogeneous Universe. I: Methodology and Preliminary Results"

3. Martel, H., Premadi, P., & Matzner, R., 1998, "*Morphological Evolution of Galaxies*", *Astrophysical Journal*, 497, 512
4. Tomita, K., Premadi, P., & Nakamura, T.T., 1999, "*Various Approaches to Cosmological Gravitational Lensing in Inhomogeneous Models*", *Progress of Theoretical Physics Suppl.*, 133, 85
5. Martel, H., Premadi, P., & Matzner, R., 2000, "*Convergence Test of Multiplane Methods in Gravitational Lensing*", *Astrophysical Journal*, 537, 28
6. Premadi, P., Martel, H., Matzner, R., & Futamase, T., 2001, "*Light Propagation in Inhomogeneous Universes. II: Cosmological Parameter Survey*", *Astrophysical Journal Suppl.* 135, 7
7. Premadi, P., Martel, H., Matzner, R., 2001, "*Cosmological Parameter Survey Using the Gravitational Lensing Method*", *Publication of the Astronomical Society of Australia*, 18, 201
8. Martel, H., Premadi, P., & Matzner, R., 2002, "*Light Propagation in Inhomogeneous Universes. III. Distributions of Image Separations*", *Astrophysical Journal*, 570, 17-32
9. Premadi, P., 2003, "*Lensa Gravitasi oleh Lubang Hitam*", *Kontribusi Fisika Indonesia*, Vol. 14., No. 4, 135
10. Premadi, P. 2004, "*Recent Developments in Our Understanding of the Universe*", *Physics Journal of the Indonesian Physical Society*, C8, 518,
11. Premadi, P. and Martel, H, 2004, "*Light Propagation in Inhomogeneous Universes. IV. Strong Lensing and Environmental Effects*", *Astrophysical Journal*, 611, 1, 1-11
12. Martel, H. and Premadi, P. 2008, "*Light Propagation in Inhomogeneous Universe. V. Gravitational Lensing on High Redshift Supernovae*", *Astrophysical Journal*, 673, Issue 2, pp. 657-663
13. Hidayat, T., Mahasena, P, Dermawan, B, Hadi TW, Premadi PW, and Herdiwijaya D., 2012, "*Clear sky fraction above Indonesia*", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 427, Issue 3
14. Hidayat, T., et al, 2014, "*Radio Frequency Interference Measurements in Indonesia. A survey to establish a radio astronomy observatory*", *Experimental Astronomy*, Vol. 37, Issue 1

15. Huda, I. N., et al, 2021, “*Measuring the impact of Indonesian antennae on global geodetic VLBI network*”, *Experimental Astronomy*, Vol. 52, Issue 1-2
16. Premadi, P. W., Nugroho, D. H., and Jaelani, A. T., 2021, “*Properties of the Environment of Galaxies in Clusters of Galaxies CL 0024+1654 and RX J0152.7*”, *Journal of Mathematics and Fundamental Sciences*, Vol. 53, No. 3
17. Husen, B. F. and Premadi, P. W, 2024, “*Exploring the Impact of Variations of Planets’ Obliquity and Eccentricity on Its Temporal Distribution of Surface Temperature*”, *Institute of Physics*, in press

B. Proceedings

1. Nuclear Physics: 19th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Paris, 2000, CD-ROM version,
2. Numerical Astrophysics, Tokyo, 1999
3. Gravitational Lensing: Recent Progress and Future Goals, Boston, 1999
4. Seminar Ilmiah MIPA-ITB, ITB 2000
5. 20th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Austin, 2002
6. Premadi, P. W. & Hidayat, T., 2001, editors, *Prosiding Seminar Sehari 65 Tahun Jorga Ibrahim*, ITB
7. Proceedings of the IAU 8th Asia Pacific Regional Meeting, Vol. I, 2003
8. *Impact of Gravitational Lensing on Cosmology*, IAU S225, Springer, 2004
9. Premadi, P. W. & Martel, H., 2004, “*Gravitational lensing of giant voids in large scale structure of the Universe*”, Proceedings of the 22nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Stanford, 2004, CD-ROM
10. Proceedings of the 9th Asia-Pacific IAU Regional Meeting, 2005
11. Premadi, P, W. & Mariyam, A.S. 2007, “*Relation between the properties of galaxies and their environments in $0.03 < z < 0.1$* ”, Proceedings of the IAU Symposium 235, Prague: *Galaxy Evolution across Hubble Time*

12. Premadi, P.W., 2007, “*Membangun Pola Pikir Saintifik*” in Proceedings Lokakarya Planetarium Jakarta, World Space Week, Oktober 2007
13. Premadi, P. W., “*Astronomy Education: Collaborative Effort towards Progress*”, July 2007, Proceedings of Gunma Astronomical Observatory, Japan
14. Dading H. Nugroho & Premana W. Premadi, 2008, “*Relation between galaxies’ intrinsic properties and their environment in 2 cluster of galaxies*”, Proceedings of the 10th Asia-Pacific IAU Regional Meeting, Kunming, China, 1-4 August 2008
15. Yatny Yulianty & Premana Premadi, in Dermawan (ed): Proceedings of the Indonesia Astronomy and Astrophysics Symposium, Bandung, 2009
16. Premadi, P., “*Universe Awareness in Indonesia*”, Proceedings of the 11th APRIM, 2011, Chiang Mai, Thailand
17. Soekiyah Permani & Premana W. Premadi, “*Pendidikan Astronomi sebagai Sains Dasar*”, in Premadi et al (eds), 2012, Proceedings Seminar Pendidikan Astronomi, Bandung 2011
18. Anton T. Jaelani & Premana W. Premadi, 2014, “*Hubble constant estimation from 18 gravitational lens systems*”, Proceedings HAI 2014
19. Premana W. Premadi & Ferry Simatupang, Proceedings HAI 2013
20. Anton T. Jaelani & Premana W. Premadi, 2015, “*Mass reconstruction of galaxy clusters: Abell 2219, RXC 2248 .7 -4431, and SDSS J1001+4112 using strong gravitational lensing method*”, AIP Conference Proceedings, Vol.1589, Issue 1
21. Handini, A. T., Yulianty, Y., Premadi, P.W., and Annafi, A., 2016, “*UNAWE Project: Raising the 2016 Total Solar Eclipse Awareness Through Educational Packages*”, ISSEL Proceedings, Journal of Physics Conference Series, Vol. 771, No. 1
22. Alyasyfi, M., Irfan, M, and Premadi, P, 2018, “*Perangkat Pengukur Cuaca Otomatis dan Sederhana*”, Proceedings SNIPS
23. Viridi, S., Premadi, PW, Adiwati, P., et al, 2019, “*Simulation of bioeconomy system using agent-based model in the case of green, smart, and conventional farming*”, IOP Conference Series, Earth and Environmental Sciences, Vol. 230, Issue 1.

24. Jaelani, A. T., et al, 2019, “Constraints on Dark Energy models in cosmology from double source plane strong lensing system, JPhCS
25. Premadi, P., 2020, “Astronomy as Entrance to STEAM Capacity Building”, Cambridge University Press
26. Yuna, D. and Premadi, P., 2020, “Considering Astro-Tourism Potential in Indonesia Using GCIS-MCDA”, Cambridge University Press
27. Premadi, P. W., “Fasilitator Pendidikan Sains: Profesi yang perlu dikembangkan”, Proceedings Seminar Pendidikan Astronomi, 2021
28. Premadi, P. W. et al. 2024, editor and contributor, Proceedings of the International Symposium: *From the Universe Back to Earth: Developing Astronomy to Meet Today’s Natural Challenges*, IOP, in press

C. Bab dalam buku

1. In Karlina Supelli, “Dari Kosmologi ke Dialog”, 2012, Penerbit Mizan
2. “Universe Awareness” in “PASTA”, Alumni ITB 1983, 2012
3. In Jan Visser and Muriel Visser (eds): “Seeking Understanding”, Brill, 2020, <https://brill.com/view/title/56274?lang=en>
4. In H. D. Kristanto & I. E. Anggun (eds), 2023, “Menemukan Allah dalam Sains dan Manusia”, Penerbit Kanisius

D. Lain-lain

1. “75 Tahun Teropong Zeiss”, Kompas, 07 Juni 2003
2. “Memikirkan Sains untuk Publik, Kompas, 11 September 2003
3. Cosmology introductory for the Indonesian translation of Bruno Guiderdoni’s book, “Membaca Alam, Membaca Ayat”, Mizan, 2004
4. ”15 Tahun Hubble Telescope”, Kompas, 25 Juni 2005
5. “Dialogue between Science and Religion in Indonesia: A Preliminary Assessment through the Eyes of an Infant Forum”, Metanexus online publication.
6. “Alam, Manusia, dan Yang Maha Mulia”, Kompas, 19 September 2009
7. “Sains dan Pendidikan Sains”, Kompas, 28 November 2013

8. “Alam Semesta Dini”, Majalah Astronomi, 2014
9. “STEAM Teacher Education Program”, contributor and editor, 2015
10. Universe Awareness Indonesia:
<http://www.unawe.org/updates/unawe-update-2017-010/>
11. “Membangun Pola Pikir Ilmiah Untuk Menggugah Welas Asih”, Pidato Kebudayaan, Jakarta, November 2016
12. Pendidikan Nalar dan Nurani, Kompas, 5 Mei 2017
13. Obituari untuk Stephen Hawking, Majalah Tempo, 19 Maret 2018
14. theconversation.com : “Bersejarah: tim astronomi temukan gambar pertama lubang hitam Einstein”, online science communication
15. “Keindahan, Seni, dan Sains”, Kompas, 19 Desember 2020.
16. “Mengurangi kesenjangan antara kemajuan sains dan pendidikan sains”, Kompas 13 November 2021
17. “Arts, science and technology as mind capital in modern civilization”, The Jakarta Post, 18 Desember 2021
18. “Setelah riset 3 dekade NASA cs meluncurkan teleskop canggih James Webb Space Telescope untuk amati semesta awal”, theconversation.com: 24 Desember 2021
19. “Menyelami Gerhana Matahari Total”, Kompas 18 April 2023
20. “Sains dan Kebudayaan”, Kompas 28 Desember 2023

VII. PENGHARGAAN

AWARDS:

1. Institut Teknologi Bandung, Innovation and Creativity Award, 2016
2. General Electric Indonesia Award: Inspiring Women in STEM, 2019
3. Berita Satu Award for Inspiring Women in STEM, 2021
4. Best Public Service Award, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, ITB, 2022
5. Royal Astronomical Society, UK: Honorary Fellow, 2023

PENGHARGAAN untuk kontribusi pada sains, pendidikan, dan pengabdian pada masyarakat

1. One of 95 Inspiring Women 2023: Ministry of Women Empowerment and Child Protection

2. Forbes Magazine, April 2020, Inspiring Women 2020
3. Selected Researcher, Institut Teknologi Bandung, 2018, 2018,
<https://wrrim.itb.ac.id/wp-content/uploads/sites/32/2019/09/Buku-WRRIM-2018.pdf>
4. Asteroid Premadi 12937 3024 P-L: Newly Named Asteroids, IAU
Minor Planets Circular March 2017
5. Tempo Magazine: One of the Persons of the Year 2004

VIII. SERTIFIKASI

Sertifikasi Dosen



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532
🌐 fgb.itb.ac.id [f](#) FgbItb [t](#) FGB_ITB
📱 [@fgbitb_1920](#) [v](#) Forum Guru Besar ITB

