

اندازه‌گیری نمایه عمق نوری خوشه‌های کهکشانی با استفاده از اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی

شانت باگرام

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

پست الکترونیکی: baghram@sharif.edu

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۳۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۷/۱۰)

چکیده

توزیع باریون‌ها در ساختارهای بزرگ مقیاس یکی از سوالات مهم کیهان‌شناسی است. این توزیع، اطلاعات ارزشمندی درباره تشکیل و تحول کهکشان‌ها را در اختیار می‌گذارد. از طرف دیگر مسئله باریون گمشده در مدل استاندارد هنوز محل بحث است. یکی از مهم‌ترین ساختارهای کیهانی برای بررسی میزان باریون‌ها و توزیع آنها، خوشه کهکشانی است. در این مقاله پیشنهاد شده است که با استفاده از اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی در خوشه‌های کهکشانی که در کهکشان مرکزی آن ابرنواختر نوع یک وجود داشته باشد می‌توان نمایه عمق نوری خوشه کهکشانی را محاسبه کرد. برای به دست آوردن این نمایه سرعت توده خوشه کهکشانی با استفاده از ابرنواختر نوع یک محاسبه می‌شود. این اثر را برای خوشه‌های کهکشانی در انتقال به سرخ های $z < 0.15$ با قدرت تفکیک فواصل 10^6 کیلوپارسکی که معادل قدرت تفکیک رصدی ۱ درجه قوسی در تابش زمینه کیهان است را می‌توان به دست آورد.

واژه‌های کلیدی: ماده باریونی، خوشه کهکشانی، اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی، ابرنواختر نوع یک

۱. مقدمه

خوشه‌های کهکشانی به عنوان بزرگ‌ترین و پرجرم‌ترین ساختارهای مقید در کیهان محیط مناسبی برای شناسایی و بررسی توزیع باریون‌ها در کیهان هستند. بیشتر جرم باریونی خوشه‌های کهکشانی به صورت گاز یونیزه میان کهکشانی است. در صورتی که دمای گاز بالا باشد آن را می‌توان با تابش ایکس اندازه‌گیری کرد. البته مقدار قابل توجهی از گاز در دمای کمتری است که تابش ایکس ندارد و از طرفی آنقدر سرد

مشاهدات تابش زمینه [۱] و ساختارهای بزرگ مقیاس کیهانی [۲] تطابق بسیار خوبی با مدل استاندارد کیهان‌شناسی Λ CDM دارد. البته سوالات مهمی مانند انرژی تاریک، ماده تاریک و فیزیک کیهان اولیه هنوز بی‌پاسخ مانده است [۳]. علاوه بر این سه سؤال بنیادی مسئله تشکیل و تحول کهکشان‌ها و توزیع باریون‌ها در کیهان از سوالات اساسی کیهان‌شناسی است [۴].

اثر اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی و مفهوم عمق نوری می‌پردازیم. در بخش ۳ مفهوم تابع توزیع نمایه عمق نوری با روش متوسط‌گیری زاویه‌ای معرفی می‌شود. در بخش ۴ به بررسی بازسازی سرعت توده به روش ابرنواختر نوع یک می‌پردازیم. در بخش ۵ نتایج و پیش‌بینی اندازه‌گیری عمق نوری را برای داده‌های آتی داریم و در نهایت در بخش ۶ نتایج و کارهای پیش رو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی و عمق نوری

خوشه‌های کهکشانی

همان طور که در مقدمه ذکر شد می‌توان از اثر سونیائف زلدوویچ بر روی تابش زمینه کیهانی و اختلالی که در بازه‌های بسامدی بر روی آن ایجاد می‌کند، پی به وجود ساختارهای سر راه یا حتی به فیزیک دوره باز یونش پی برد. اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی تقریباً طیف جسم سیاه تابش زمینه را تغییر نمی‌دهد و در بسامد ۲۱۸ هرتز، که اثر گرمایی قابل صرف نظر است، قابل مشاهده می‌باشد. این اثر با استفاده از ماهواره پلانک [۸] برنامه رصدی ACT [۹] و SPT [۱۰] با بررسی تابع همبستگی ضربی این اثر با توزیع سرعت دوتایی کهکشان‌ها در انتقال به سرخ پایین به دست آمده است.

تغییرات دمایی تابش زمینه کیهان بر اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی به صورت زیر است

$$\frac{\Delta T}{T} |_{kSz}(\hat{n}) = -\frac{\sigma_T}{c} \int \frac{d\chi}{(1+z)} e^{-\tau(\chi)} n_e(\chi \hat{n}, \chi) \bar{v}_e \cdot \hat{n}, \quad (1)$$

که \bar{T} دمای میانگین تابش زمینه کیهان و χ فاصله همراه تا انتقال به سرخ z است و σ_T سطح مقطع پراکندگی تامسون است. τ عمق نوری و n_e چگالی متوسط الکترون‌ها و \bar{v}_e سرعت خاصه الکترون‌های آزاد است و جهت مشاهده را از مشاهده‌گر به منبع انتخاب کرده‌ایم. عمق نوری را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد

$$\tau = \int dl n_e \sigma_T, \quad (2)$$

که dl دیفرانسیل طول فیزیکی برای ناحیه‌ای از کیهان است که الکترون‌های خشی وجود دارند. حال اگر اثر محیط یونیزه و

نیست که هیدروژن را یونیزه نکند. گاز یونیزه ولرم میان کهکشانی در خوشه را می‌توان با استفاده از اثر سونیائف زلدوویچ رصد کرد [۵ و ۶]. این اثر به دلیل اندرکنش فوتون‌های کم انرژی تابش زمینه کیهان با الکترون‌های آزاد پراثری میان کهکشانی تحت عنوان اثر معکوس کامپتون ایجاد می‌شود. اثر سونیائف زلدوویچ به دو نوع گرمایی و جنبشی تقسیم می‌شود. نوع گرمایی آن به دلیل حرکت گرمایی الکترون‌های آزاد است و اثر جنبشی آن مربوط به حرکت سرعت توده^۱ می‌باشد.

در این مقاله پیشنهاد شده است که از اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی، برای به دست آوردن توزیع الکترون‌های آزاد و به بیان دیگر عمق نوری خوشه‌های کهکشانی استفاده شود. اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی که بر روی دمای تابش زمینه کیهان به صورت تصحیح دمایی مشاهده می‌شود، به فیزیک توزیع باریون‌ها و سرعت توده مرتبط است. از این رو چندگانگی در تعیین اثر هر کدام وجود دارد. در [۷] پیشنهاد شده است که می‌توان از فاصله درخشندگی شمع استاندارد ابرنواخترهای نوع یک که در کهکشان مرکزی روشن^۲ یک خوشه اتفاق می‌افتد، برای فاصله‌سنجی خوشه استفاده کرد. این ابرنواخترها اگر در کهکشان مرکزی رخ بدهند سهم سرعت خاصه کهکشان‌های داخل خوشه قابل صرف نظر بوده و سهم مهم تصحیح فاصله درخشندگی به خاطر سرعت توده خوشه خواهد بود.

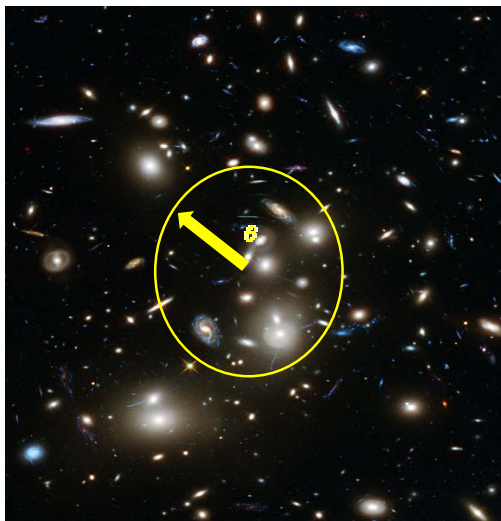
در این مقاله به صورت اخص نشان می‌دهیم که میانگین عمق نوری خوشه در زاویه سمتی یکسان در تصحیحات مدول فاصله^۳ نور ابرنواختر متناسب با سرعت خاصه ساختارها در گستره خطی است. از این رو این متوسط‌گیری به مدل کیهان‌شناسی از یک سو و فیزیک و توزیع باریون‌ها از سوی دیگر مرتبط است. این مطالعه در راستای پژوهش‌های انجام شده برای استفاده از اثرات ثانویه بر روی تابش زمینه کیهان و فیزیک انتقال به سرخ‌های پایین است.

ساختار این مقاله به شکل زیر است: در بخش ۲ به بررسی

۱. Bulk velocity

۲. Bright Central Galaxy (BCG)

۳. Distance modulus



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) خوشه کهکشانی Abell 2744 و مکان هندسی نقاطی از خوشه که تحت زاویه θ دیده می‌شود.

زاویه‌ای مشخص شده بررسی کرد. قدرت تفکیک رصدهای تابش زمینه کیهانی برای اثرات ثانویه از مرتبه یک دقیقه قوسی است. این بدین معنا است که یک خوشه کهکشانی را می‌توان با دقت ۱۰۰ کیلوپارسک تا انتقال به سرخ $z \sim 0.15$ رصد و نمایه عمق نوری آن را به دست آورد. از طرف دیگر با دانستن سرعت توده خوشه با استفاده از روش بازسازی سرعت $\vec{v}_{\text{rec}}(\vec{x})$ (در حالت کلی) یا با استفاده از ابر نواخترهای نوع I که در کهکشان مرکزی روشن خوشه وجود داشته است می‌توان نمایه عمق نوری را به صورت زیر به دست آورد.

$$\frac{\Delta T}{T}(\vec{x}) \vec{v}_{\text{rec}}(\vec{x})(\vec{\theta}) = \sigma_{v_r}^2 \tau(\theta), \quad (4)$$

که در آن $\sigma_{v_r}^2$ سرعت توده است، و در حالت کلی فقط به کیهان‌شناسی و توزیع ماده ارتباط دارد. از این رو با اندازه‌گیری کمیت $\frac{\Delta T}{T}(\vec{x})$ در هر زاویه قابل تفکیک از خوشه کهکشانی می‌توان نمایه عمق نوری را به دست آورد. متوسط‌گیری در زاویه $\vec{\theta}$ مشخص بر روی زاویه سمتی از صفر تا $\vec{\theta}$ است، انجام می‌شود (دایره زرد رنگ در شکل ۱).

در صورتی که سمت چپ معادله (۴) را به ازای هر زاویه $\vec{\theta}$ به دست آوریم. سرعت توده ساختارها در گستره خطی فقط بستگی به کیهان‌شناسی خواهد داشت. در نتیجه می‌توان نمایه عمق نوری را در هر زاویه‌ای به دست آورد.

الکترون‌های آزاد درون خوشه را بررسی کنیم اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی خوشه را می‌توان به صورت زیر به صورت تقریبی نوشت.

$$\frac{\Delta T}{T} |_{ksz}(\hat{n}, \vec{\theta}) \approx \int dl n_e \sigma_T \vec{\beta} \cdot \hat{n} \approx \tau(\vec{\theta}) \vec{\beta} \cdot \hat{n}, \quad (3)$$

که $\vec{\beta}$ سرعت بهنجار توده به سرعت نور $\hat{n} = \frac{\vec{v}_e}{c}$ است. زاویه $\vec{\theta}$ نشان دهنده زاویه دید ناظر است، که یک ضلع آن مرکز خوشه و ضلع دیگر آن مکانی از خوشه است که عمق نوری تا آن فاصله محاسبه می‌شود. در شکل ۱ به صورت نمونه و شکل‌واره خوشه Abell 2744 را مشاهده می‌کنید. دایره زرد رنگ نشان دهنده تمام نقاطی از خوشه است که تا زاویه $\vec{\theta}$ دیده می‌شود.

در بخش بعد به بررسی تابع نمایه عمق نوری با استفاده از روش متوسط‌گیری زاویه‌ای خواهیم پرداخت.

۳. تابع توزیع نمایه عمق نوری با روش

متوسط‌گیری زاویه‌ای

خوشه کهکشانی که در فاصله \vec{x} طول همراه از ناظر قرار دارد را می‌توان در انتقال به سرخ‌های پایین تفکیک زاویه‌ای کرد و نقاط متفاوت آن را تحت زاویه $\vec{\theta}$ مشاهده کرد. سپس این امکان وجود دارد که اثر دمایی سونیائف زلدوویچ را در تحت

که با دانستن انتقال به سرخ میزبان ابر نواختر و طول همراه آن $\chi(z_s)$ می توان $\bar{\beta}\hat{n}$ را با استفاده از رصد کمیت $\Delta\mu$ (مدول فاصله اختلالی) که به صورت زیر تعریف می شود به دست آورد.

$$\Delta\mu(z) = \mu_{\text{obs}} - (5 \log \bar{d}_L + 25) = 5 \log(1 - \kappa_v), \quad (8)$$

که در آن μ_{obs} مدول فاصله مشاهده شده است. در ضمن جمله $\tilde{\kappa}_v = \kappa_v / \bar{\beta}\hat{n}$ را برای ارجاع آینده تعریف می کنیم. این کمیت مستقل از سرعت توده است.

در بخش بعد متوسط گیری زاویه ای را با فاصله درخشندگی باز تعریف خواهیم کرد و به بررسی نتایج خواهیم پرداخت.

۵. نتایج و پیش بینی برای رصدهای آینده

در این بخش متوسط گیری زاویه ای معرفی شده در رابطه (۴) را با توجه به پیشنهاد جدید رصدی و با مدول فاصله اختلالی می نویسیم

$$\frac{\Delta T}{T}(\bar{x}) \Delta\mu(\bar{\theta}) \approx 2.17 \tilde{\kappa}_v \sigma_{v_r}^2 \tau(\theta), \quad (9)$$

که $\sigma_{v_r}^2$ سرعت توده شعاعی را که بستگی به کیهان شناسی دارد را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد

$$\sigma_{v_r}^2 = \frac{1}{3} f^2 H_0^2 \int \frac{dk}{2\pi^2} P(k, z) W^2(kR(z)), \quad (10)$$

که در آن $P(k, z)$ طیف توان ماده در گستره خطی است. $W(kR(z))$ تابع پنجره در فضای فوریه با مقیاس طول همراه

R است که با انتقال به سرخ z مشخص می شود و $f \equiv \frac{d \ln \delta}{d \ln a}$ تابع رشد است که مشتق لگاریتمی تباین چگالی ماده δ بر حسب عامل مقیاس است. باید توجه داشت که سرعت خاصه در گستره خطی در راستای دید $\frac{1}{3}$ سرعت کل است که در رابطه (۱۰) در نظر گرفته شده است. از آن جایی که سرعت خاصه در انتقال به سرخ های پایین محاسبه شده است پارامتر هابل را با ثابت هابل می توان جایگزین کرد.

در ادامه فرض می کنیم که مدل استاندارد کیهان شناسی با پارامتر چگالی ماده تاریک و ثابت کیهان شناسی با مقادیر

$$\Omega_m = 0.3 \text{ و } \Omega_\Lambda \text{ و پارامتر هابل } H_0 = 70 \frac{\text{km}}{\text{s}} / \text{Mpc}$$

در بخش بعد به بررسی روش بازسازی سرعت از طریق ابر نواخترهای نوع یک خواهیم پرداخت.

۴. سرعت بازسازی شده: سرعت توده و

ابرنواخترهای نوع یک

ساختارهای بزرگ مقیاس کیهانی در گستره خطی به دلیل وجود اختلالات دارای سرعت خاصه نسبت به انبساط هابلی هستند. این سرعت خاصه را به صورت کلاسیک و با استفاده از فاصله سنجی و با دانستن مدل کیهان شناسی می توان از رابطه زیر به دست آورد [۱۱]:

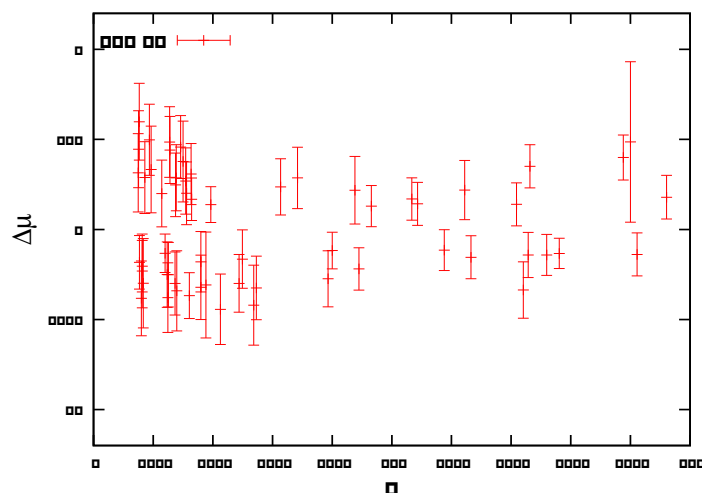
$$v_p \approx cz - H_0 d, \quad (5)$$

که در آن v_p سرعت خاصه است، z انتقال به سرخ اندازه گیری شده از ساختار کیهانی است، H پارامتر هابل و d فاصله فیزیکی است. برای اندازه گیری فاصله فیزیکی باید از ایده شمع استاندارد یا استفاده از روابط مقیاسی کهکشانی استفاده کرد. در مقاله [۱۲] روشی برای اندازه گیری سرعت ها با استفاده از شمع استاندارد پیشنهاد شده است که از آن روش برای اندازه گیری سرعت که در رابطه (۴) آمده است، استفاده می کنیم. فرض کنید ابرنواختر نوع یک در انتقال به سرخ مشاهداتی z_s با مدول فاصله قدری μ مشاهده شده باشد. در کیهان اختلالی بر اثر اثرات سراهی مدول فاصله ابر نواختر به صورت زیر اصلاح می شود [۱۳]:

$$\mu(z) = 5 \log \bar{d}_L \times [1 - \kappa_v - \kappa_g - \kappa_{\text{SW}} - \kappa_{\text{ISW}}] + 25, \quad (6)$$

که κ_v جمله مربوط به سرعت خاصه میزبان ابر نواختر نوع یک است. κ_g تصحیح حاصل از همگرایی گرانشی، κ_{SW} تصحیح حاصل از اثر زکس - وولف و κ_{ISW} تصحیح حاصل از اثر تجمعی زکس ولف است. در انتقال به سرخ های پایین می توان از اثرات همگرایی گرانشی، زکس وولف موضعی و تجمعی صرف نظر کرد. مهم ترین تصحیح در انتقال به سرخ های $z < 0.15$ اثر سرعت خاصه است، که به صورت زیر محاسبه می شود [۱۲]

$$\kappa_v = - \left(1 - \frac{1+z_s}{\chi(z_s) c^{-1} H(z)} \right) (\bar{\beta}\hat{n}), \quad (7)$$



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مدول فاصله ابرنواخترهای نوع یک برحسب انتقال به سرخ از مجموع داده‌های Union ۲/۱. ابرنواخترهای انتخاب شده مدول فاصله اختلالی غیر صفر با خطای 1σ دارند.

در شکل ۳ کمیت Coeff را که از $\Delta\mu$ ابرنواخترها به دست آمده را بر حسب انتقال به سرخ رسم کرده ایم. سرعت خاصه بر حسب انتقال به سرخ ابرنواختر و طیف توان ماده تاریک سرد به علاوه ماده باریونی با تابع انتقال Hu انیشتین [۱۵] به دست آمده است.

این بدین معنا است که با دانستن ضریب Coeff از مشاهده $\left\langle \frac{\Delta T}{T} \right\rangle_N (\bar{\theta})$ در زاویه‌های متفاوت می‌توان نمایه عمق نوری را اندازه‌گیری کرد. در ادامه فرض کردیم که مشاهدات آینده توسط پروژه گایا- با اندازه‌گیری اختلاف منظر و استفاده از ستاره‌های متغیر قیفاووسی - خطای کالیبره کردن ابرنواخترها را تا 50% بهبود ببخشد. در شکل ۳ نقاط آبی اندازه‌گیری ضریب Coeff با خطای بهتر شده از اندازه‌گیری ابرنواخترها به دست آورده است [۱۶].

نکته مهم دیگر این است که خطای مربوط به اندازه‌گیری ابرنواخترها مستقل از خطای اندازه‌گیری تغییرات دمای تابش زمینه کیهان است، در نتیجه سیستماتیک‌ها مستقل می‌باشند و در نهایت خطای اندازه‌گیری نمایه عمق نوری به صورت زیر به دست می‌آید

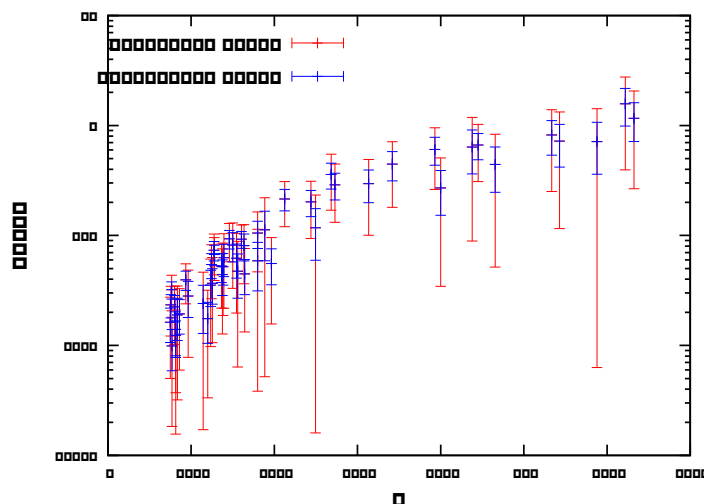
$$\sigma_{\tau} = \left(\sigma_{ksz}^2 + \sigma_{SN}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

داریم. پارامتر رشد را نیز از جواب حل خطی معادلات حاکم بر تحول تباین چگالی به دست می‌آوریم، که برابر با $f = \left(\frac{\Omega_m(1+z)^3}{E^2(z)} \right)^{0.55}$ است، که $E = H/H_0$ پارامتر هابل بهنجار شده است.

در ادامه فرض می‌کنیم که ابرنواخترهای نوع یک مجموعه Union ۲/۱ [۱۴] در انتقال به سرخ پایین دارای تصحیحات در مدول فاصله فقط بر اساس سرعت خاصه میزبان باشند. در شکل ۲ مدول فاصله اختلالی برحسب انتقال به سرخ برای ابرنواخترهایی رسم شده است، که با خطای 1σ با خط صفر تلاقی ندارند. در ادامه برای نشان دادن پیشنهاد رصدی برای به دست آوردن نمایه عمق نوری فرض می‌کنیم که تمام ابرنواخترهای رصدی در کهکشان مرکزی خوشه اتفاق افتاده باشند. در نتیجه می‌توان ضریب مورد نیاز برای ارتباط بین عمق نوری و تفاوت دمایی بر روی تابش زمینه کیهان را به صورت زیر محاسبه کرد

$$Coeff = \tau(\theta) / \left\langle \frac{\Delta T}{T} \right\rangle_N (\bar{\theta}) = \left(\frac{\Delta\mu}{2.17 \widetilde{K}_v \sigma_{v_r}^2} \right), \quad (11)$$

که شاخص N به معنای بهنجار کردن این کمیت به 10^{-6} است.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) پارامتر Coeff براساس انتقال به سرخ برای ابر نواختر نوع یک از مجموعه Union ۲.۱.

متوسط‌گیری زاویه‌ای سمتی در یک جهت مشخص از تابع همبستگی ضربی اثر سونیائف زلدوویچ جنبشی با سرعت توده بازسازی شده اطلاعات دقیقی از نمایه عمق نوری ساختار به دست می‌دهد.

همچنین در این اثر پیشنهاد شده است که برای اندازه‌گیری سرعت خاصه می‌توان از وجود ابرنواخترنوع یک در کهکشان پرجرم مرکزی خوشه استفاده کرد. با این روش می‌توان در انتقال به سرخ‌های پایین که اثر تصحیحی سرعت خاصه مهم است و قدرت تفکیک زاویه خوشه کهکشانی بالا است می‌توان از این روش استفاده کرد.

در انتها نشان دادیم که با استفاده از خطاهای بهبود یافته ابرنواخترها به دلیل کالیبره کردنی که گایا انجام خواهد داد این روش می‌تواند برای اندازه‌گیری عمق نوری مفید باشد.

در کارهای پیش رو می‌توان این روش را با داده‌های اثر سونیائف زلدوویچ گرمایی و تابش ایکس ترکیب کرد و قندهای سنگین‌تری را بر روی نمایه عمق نوری گذاشت. در پایان لازم به ذکر است که استخراج نمایه عمق نوری خوشه‌های کهکشانی، اطلاعات ارزشمندی را می‌تواند درباره فرایندهای گرمایی و ترمودینامیکی خوشه در حالت تعادل و غیر تعادل فراهم آورد. همچنین این اثر می‌تواند باعث فهم بهتر از مسئله باریون گم شده در کیهان شود.

که در آن σ_{KSZ}^2 خطای اندازه‌گیری اثر سونیائف زلدوویچ است و σ_{SN}^2 خطای اندازه‌گیری در ابرنواخترهای نوع یک است. در پایان لازم به ذکر است که استخراج نمایه عمق نوری خوشه‌های کهکشانی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را درباره فرایندهای گرمایی و ترمودینامیکی خوشه در حالت تعادل و غیرتعادل را فراهم آورد [۱۷]. در بخش آخر به نتیجه‌گیری و کارهای پیش رو خواهیم پرداخت.

۶. نتیجه‌گیری و کارهای پیش رو

توزیع الکترون‌های آزاد و به تبع آن باریون‌ها در بزرگ‌ترین ساختارهای بزرگ مقیاس مقید کیهانی یکی از سوالات مهمی است که ارتباط تنگاتنگی با تشکیل و تحول ساختارها در کیهان دارد. این تابع توزیع با استفاده از نمایه عمق نوری به دست می‌آید و اطلاعات ارزشمندی درباره فرایندهای اختر فیزیکی، سرد شدن، گرمایش و بازخورد را در اختیار قرار می‌دهد. مشاهدات اثر سونیائف زلدوویچ به عنوان اختلالات مرتبه دوم بر روی تابش زمینه کیهان مشاهده بسیار مناسبی برای اندازه‌گیری عمق نوری خوشه‌های کهکشان است. البته این اندازه‌گیری چندگانگی با اثر سرعت خاصه (توده) خوشه کهکشانی دارد.

در این مقاله به صورت مشخص پیشنهاد شده است که

مراجع

- (2016) 3172.
11. N Kaiser, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **231** (1989) 149.
 12. S Baghran, S Tavasoli, F Habibi, R Mohayae, and J Silk, *International Journal of Modern Physics D* **23**, 12 (2014) 1442025.
 13. D J Bacon, S Andrianomena, C Clarkson, K Bolejko and R Maartens, *Monthly Notices Royal Astronomy Society* 443 (2014) 1900.
 14. N Suzuki *et al.*, *Astrophys. J.* **85** (2012) 746.
 15. D J Eisenstein and W Hu, *Astrophys. J.* 496 (1998) 605.
 16. M A C Perryman *et al.*, *Astron. Astrophys.* **369** (2001) 339.
 17. N Battaglia, S Ferraro, E Schaan, and D Spergel, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **11** (2017) 040.
 1. P A R Ade, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **594** (2016) A13.
 2. M Tegmark *et al.*, *Phys. Rev. D* **69** (2004) 103501.
 3. L Amendola, *et al.*, *Living Rev. Rel.* **16** (2013) 6.
 4. H Mo, F van den Bosch, and S M White, “*Galaxy Formation and Evolution*”, Cambridge University Press (2010).
 5. Y B Zeldovich and R A Sunyaev, *Astrophys. Space Sci.* **4** (1969) 301.
 6. R A Sunyaev and Y B Zeldovich, *Comments on Astrophysics and Space Physics* **4** (1972) 173.
 7. S Baghran, “submitted to *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*”, arXiv:1703.02021 (under review).
 8. P A R Ade *et al.*, *Astron. Astrophys.* **586** (2016) 140.
 9. F. De Bernardis *et al.*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 1703, 03 (2017) 008.
 10. B Soergel *et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **461**, 3