نوسانات آکوستیکی باریون ها (BAO) Baryon ACoustic Oscillations

آلن ساندیج Alan Sandage منجم امریکایی که اولین تخمین پارامترهای دورنما حال را تعیین سن کیهان را انجام داده، (1926-2010)
می گوید "کیهان شناسی علم اندازه گیری دو کمیت است H و q"

جالب این است که اکنون نیز بحث اندازه گیری فواصل در کیهان سیار مهم است. اندازه گیری فواصل در کیهان اطلاعات ارزشمندی در مورد مولفه های تشکیل دهنده کیهان به ما می دهد. به طور اخص یکی از روش های فهم انرژی تاریک همین اندازه گیری فواصل در کیهان است. "

Cosmology: A Search for two numbers, Physics Today, 1970; 23, 2

برای اندازه گیری فواصل دو نوع کمیت اهمیت پیدا می کند. ۱) شمع های استاندارد ۲) خط کش های استاندارد.

* در اولی جرم آستروفی که روشنایی ذاتی آن را می دانیم، و در فواصل متفاوت درخشایی ظاهری آن را اندازه گیری می کنیم و از ارتباط این دو کمیت فاصله خود را تا شمع استاندارد اندازه گیری می کنیم.

* نوع دوم خط کش های استاندارد هستند، اگر در کیهان طول مشخصه ای وجود داشته باشد با اندازه گیری زاویه دید این خط کش می توان فاصله کیهانی را به دست آورد.

(توجه داشته باشید که در اولی فاصله درخشندگی و در دومی فاصله زاویه ای فقری را اندازه گیری می کنیم.)

نوسانات آکوستیکی باریونی هم نیز خط کش استانداردی را برای ساختارهای بزرگ مقیاس ایجاد می کند که با اندازه گیری آن می توان انبساط کیهان را در فواصل متفاوت (انتقال به سرخ های متفاوت) به دست آورد.

فیزیک BAO بستگی به فیزیک زمان واخیستگی Decoupling و آخرین سطح پراکندگی (LAST SCATTERING SURFACE) دارد.

2) ی

- بیان دیگر شمع های استاندارد مانند ابرنواخترهای نوع Ia (Type Ia, SNe) و خط کش ها

استاندارد مانند BAO این امکان را ایجاد کرده اند که نوسان فاصله را از شناسی گروه محلی فراتر برده و مقیاس های

کیهانی (خارج کهکشانی) "Extra-galactic" را مورد بررسی قرار دهد.

- ایده استفاده از خط کش استاندارد در زندگی روزمره نیز وجود دارد، شما با دانستن قد مبنایتان آن ها، فاصله خود را

با زاویه ای که آنرا می بینید تخمین می زنید. البته در کیهان شناسی دو پیچیدگی نیز وجود دارد. ۱) کیهان خمش دارد و هندسه

آن هندسه اقلیدسی نیست. ۲) کیهان در حال انبساط است. در نتیجه در تخمین فواصل این دو مورد را باید در نظر بگیریم.

البته مشکل اساسی در مورد اخیر در استفاده از خط کش های استاندارد در کیهان شناسی خمش یا انبساط نبوده است.

بلکه این نکته که ما اطلاعی در مورد طول واقعی ساختارهای کیهانی مانند کهکشان ها را نداریم. این موضوع در بحث

مجادله Shapley و Curtis در سال 1920 بود که با ندانستن اندازه واقعی کهکشان ها (سحابی ها)

نمی دانستند که این اجرام داخل یا خارج کهکشان راه شیری است.

البته خط کش های استانداردی مانند رادیو کهکشان ها پیشنهاد شده

Kellermann, K.T., Nature
361: 134 - 136 (1993)

برای مقید کردن کیهان شناسی استفاده شده است.

به طور مثال در کار جکسون و داجسون Jackson, J.C. & Dodgson, M.

از این رادیو کهکشان ها برای MNRAS, 285: 806 - 810 (1997)

تعیین فاصله استفاده شد و قبل از نتیجه ابرنواخترها معلوم بود که $\Omega_m < 0.3$ و احتیاج به ثابت کیهان شناسی

نمونه دیگر استفاده از خوشه های کهکشانی و مطالعه شار X-ray آن ها بوده است ارتباط شار X به جرم

گازی خوشه و به تبع آن به اندازه خوشه و بازخ ثابت بدون وجود گاز خط کش دیگری شده است

Statistical Standard Rulers (SSR) خط‌کش‌های استاندارد آماری

نوع دیگری از خط‌کش‌های استاندارد، خط‌کش‌های آماری هستند که BAO نمونه بارز و مهم آن است.

در این نوع خط‌کش‌ها خوشه‌های کهکشان‌ها مبنای ویژه‌ای دارند که این مبنا را نسبت به سایر خط‌کش‌ها برتر می‌کند و اندازه‌گیری فاصله زاویه‌ای توسط این طول را بسیار آسان‌تر می‌کند.

Shanks, T., Fong, T., Boyle, B. J. and Peterson, B. A.
MNRAS, 227 : 739 - 748

"There is one further important reason for searching for weak feature in $\xi_{qq}(r)$, the quasar-quasar correlation function, at large seperations. if a particular feature were found to appear in both galaxy correlation function at low redshift and the QSO correlation function in high redshift, then a new cosmological test for q_0 might possible"

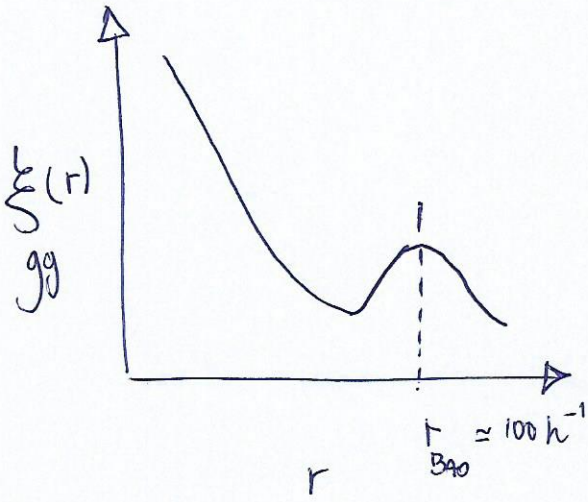
"پیدا کردن ویژگی" اثر خفیف در طول‌های $100h^{-1}$ Mpc ($128h^{-1}$) ابتدا در ساده‌ترین شکل دیده شد.

Broadhurst, T. J., Ellis, R. S., Koo, D. C. and Szalay, A. S.
Nature, 343 : 726 - 728 (1990)

BAO به صورت طول مشخصه در تابع همبستگی دو نقطه‌ای ساختارها دیده می‌شود.

تابع همبستگی دو نقطه‌ای را معمولاً به صورت زیر تعریف کرده‌ایم.

$$\xi_{gg}(r) = \langle \delta_g(x)\, \delta_g(x+r) \rangle$$

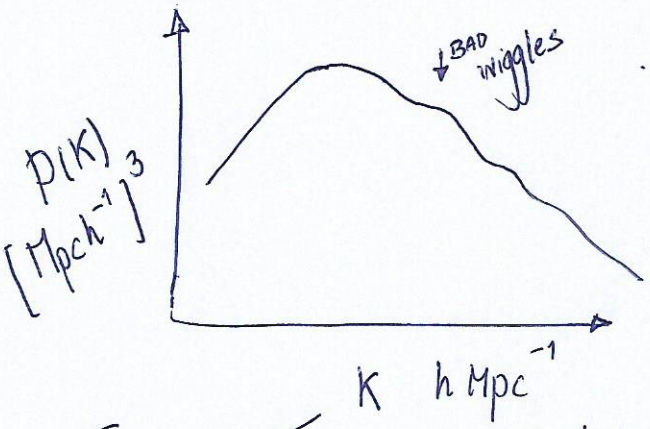


قله اصلی دیگر، ضعیف‌تر ماده در فضای فوریه است.

BAO خود را به صورت نوسناتی در ضعیف‌تر ماده نشان می‌دهد.

اثر مشابه فیزیک BAO بر روی ضعیف‌تر ماده تابش

پس زمینه کیهان دیده می‌شود.



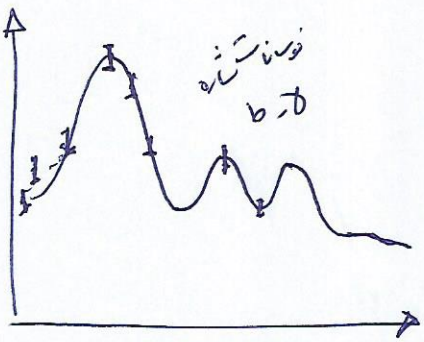
نکته جالب این است که فوتون‌ها پس از آخرین سطح پراکندگی شان آزاد کرده‌اند و در نتیجه فیزیک نوسانات شاه باریون - فوتون در حضور تابش گرانشی ماده تاریک در ضعیف‌تر CMB به وضوح بیشتری دیده می‌شود.

$$\left\langle \frac{\Delta T}{T}(\hat{n})\, \frac{\Delta T}{T}(\hat{n}') \right\rangle = \sum_l \frac{(2l+1)}{4\pi} C_l P_l(\cos\theta_{\hat{n}\cdot\hat{n}'})$$

متوسط آماری تابع دو نقطه‌ای فوتون‌ها

l ضعیف‌تر زاویه‌ای

C_l تابع شناخته



در حالی که اثر اولیه نوسانات بر روی باریون‌ها وضوح کمتری دارد. از این رو آشکارسازی این سیگنال بر روی تابع دو نقطه‌ای ساختارها با ضعیف‌تر تحت تأثیر است. دلیل این سختی آن است که ماده باریونی پس از سطح آخرین پراکندگی با ماده تاریک در ارتباط گرانشی بوده و دارای گسترده غیرخطی رشد اختلال‌ها شده است

برای بدست آوردن ضعیف‌ترین، ابتدا باید تابع همبستگی دونقطه‌ای را حساب کنیم.

برای این محاسبه از روش "Landy-Szalay estimator" استفاده می‌کنیم.

Landy, S.D. & Szalay, A.S. 1993, ApJ., 412, 64

$$\xi(r) = \left[DD(r)\frac{N_{RR}}{N_{DD}} - 2DR(r)\frac{N_{RR}}{N_{DR}} + RR(r) \right] \Big/ RR(r)$$

- $DD(r)$ تعداد جفت ساختارهایی است که در فاصله $r \pm \frac{\Delta r}{2}$ وجود دارند data-data pairs

- $DR(r)$ تعداد جفت‌هایی است که یکی از داده‌ها مربوط به توزیع تصادفی باشد data-random pairs

N_{RR}, N_{DD}, N_{DR} توابع هنجاری‌اند.

- $RR(r)$ هر جفت از نمونه تصادفی انتخاب شده است.

برای کاهش نویز می‌توان تعداد داده‌های تصادفی را بزرگتر از نمونه رصدی در نظر گرفت.

نکته مهم بعدی این است که نمونه کهکشانی انتخاب شده برای محاسبه تابع دونقطه‌ای باید دریک بازه قدری باشد

به طور مثال کهکشان‌های روشن سرخ Luminos Red Galaxies از SDSS

برای ضعیف‌ترین انتخاب شده است.

The 3D power-spectrum of galaxies from the SDSS

M. Tegmark et al. astro-ph/ 0310725

Astrophys. J. 606 : 702, (2004)

فیزیک BAO

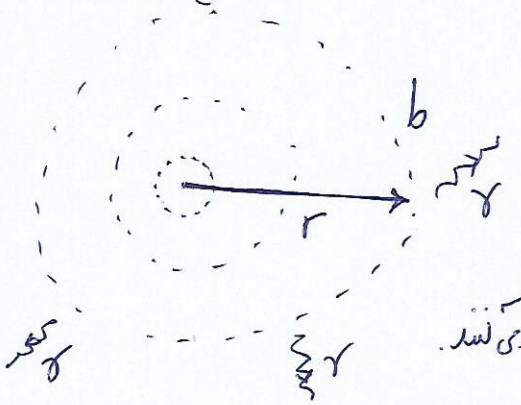
پیش از زمان واجفتیدگی سیال کیهانی از ذرات باریونی، فوتونی تشکیل شده است که به خاطر پراکندگی تامسون به شدت جفت شده است. فشار فوتونی و گرانش در تعادل و سیال در حال نوسان است

سرعت انتشار یک ناحیه فراچگال سیال فوتونی - باریونی

$$c_s = \frac{c}{\sqrt{3(1+R)}}$$ می باشد

$$R \equiv \frac{3\rho_b}{4\rho_\gamma} \simeq \frac{\Omega_b}{1+z}$$

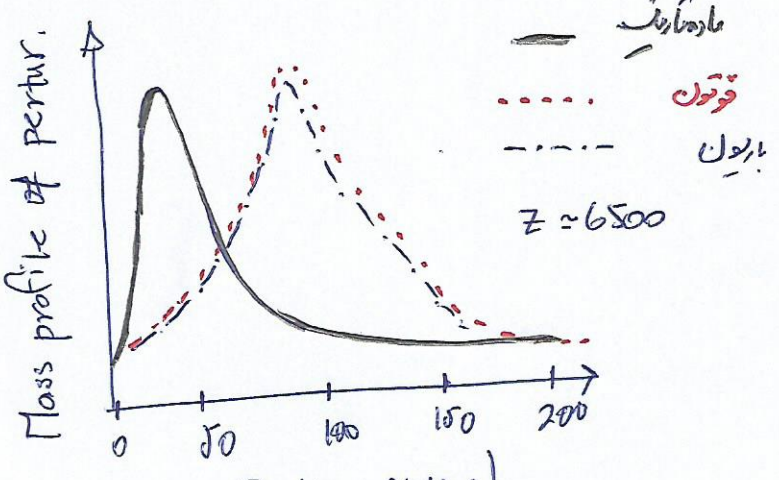
در زمان واجفتیدگی، کیهان به شدت خنثی می آید و در نتیجه فشار فوتونی برداشته می شود و فوتون ها شروع به آزاد شدن می کنند که نتیجه آن تابش پس زمینه کیهان است.

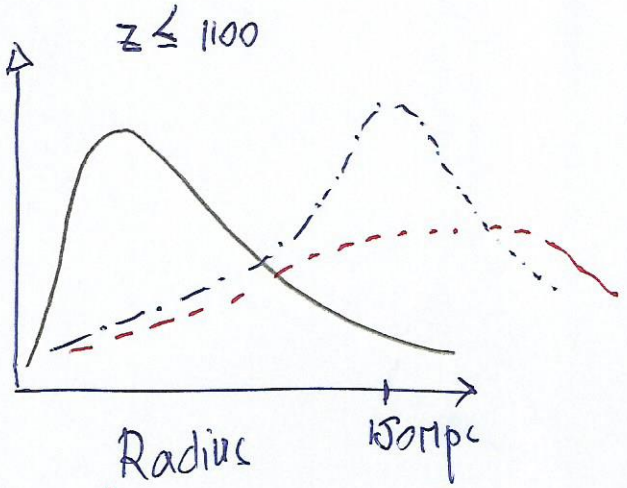


موقعیت باریون ها تابش آزادی کند.

فوتون ها تابش آزادی کند.

حال ماده تاریک و باریون به صورت گرانشی جفت شده اند، در نتیجه ماده تاریک نیز در این فشردگی دارای خوشه ای خواهد شد.



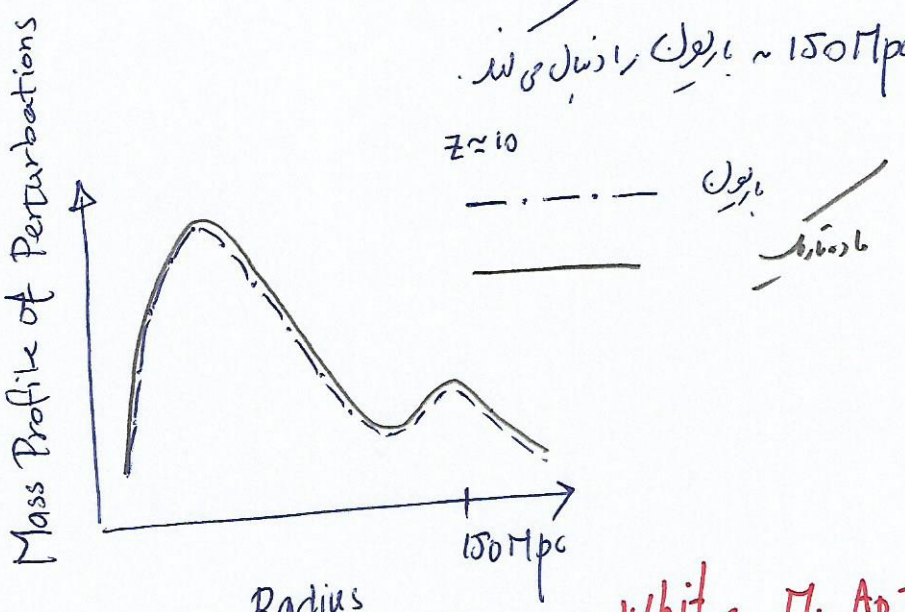


تابش آزاد فوتون ها

w.astro.berkeley.edu/~mwhite/bao/

7,

در نهایت ماده تاریک هم در مقیاس ~ 150Mpc باریون را دنبال می کند.



Eisenstein D.J., Seo, H.J. and White, M. ApJ. 664: 660-674 (2007)

احتمال شکل گیری کهکشان ها در ناحیه ای با چگالی جرمی بالا بیشتر است در ادامه این استدلال است که اگر به بررسی خوشه ی کهکشان ها بپردازیم خواهیم توانست مقیاس BAO را به دست آوریم.

فاصله BAO را می توان از مجذور طول همراه صوت سیال باریون-فوتونی محاسبه کنیم.

$$D = \int_{z_{rec}}^{\infty} \frac{c_s\, dz}{H(z)} = \frac{1}{\sqrt{\Omega_m H_0^2}} \frac{2c}{\sqrt{3 z_{eq} R_{eq}}} \ln\left[\frac{\sqrt{1+R_{rec}}+\sqrt{R_{rec}+R_{eq}}}{1+\sqrt{R_{eq}}}\right]$$

↓ Sound Horizon

↓ recombination redshift

که

$$R \equiv \frac{3\rho_b}{4\rho_\gamma} \quad , \quad z_{eq} = \frac{\Omega_m}{\Omega_{rad}}$$

↓ مقیاس برابری

مقیاس هم زمانی ماده و تابش

Komatsu, E, Dunkley J., Nolta M.R. et al. arXiv: 0803.0547

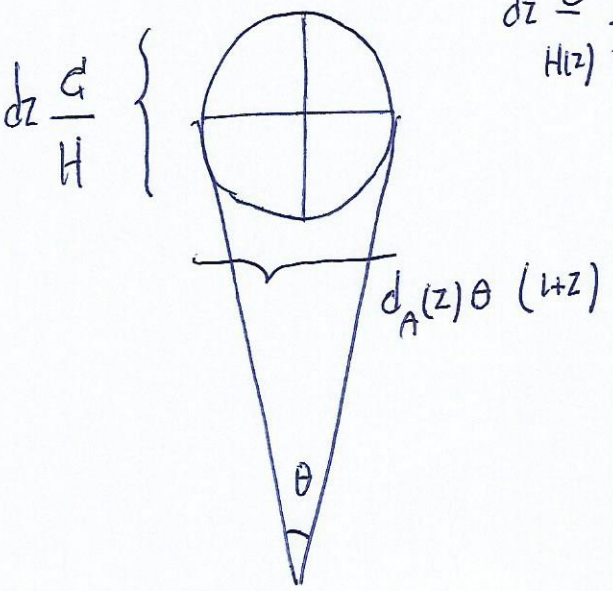
که در آن Ω_m ، Ω_{rad} را به دست می آید و در نتیجه افق صوتی سیال بی نیز مشخص است. با حل معادله گرانش طول BAO با پارامتر h^{-1} و بدون آن بود.

$$s = 146.8 \pm 1.8\ \text{Mpc} \quad \text{or} \quad s \simeq 105\, h^{-1}\ \text{Mpc}$$

$$h = 0.7\ (100\ \text{km/s/Mpc})$$

از آن جایی که طول همراه افق صوتی سیال نوترون، باریون تقریباً گسترده خطی قرار دارد از این رو می‌توان BAO را تبدیل به یک تست Alcock-Paczynski (AP) کرد.

آزمون AP بدین معناست که از مقیاس BAO می‌توان برای اندازه‌گیری فاصله زاویه‌ای مقیاسی و آهنگ انبساط کیهان استفاده کرد. فرض کنید کره‌ای به شعاع همراه افق صوتی به شکل زیر باشد.



فاصله عمودی راستای دید $\frac{c}{H(z)}dz$ پهنای پراستای دید $d_A(z)\,\theta$ یکسان خواهند بود.

تعریف طول همراه:

$$\begin{cases} H(z) = \dfrac{c\,\Delta z}{S_{\parallel}(z)} \\ d_A(z) = \dfrac{S_{\perp}}{\Delta\theta(1+z)} \end{cases}$$

AP-Test Constrain $H(z) \times d_A(z) = \dfrac{c\,\Delta z}{\Delta\theta(1+z)}$

تمام پارامترها اندازه‌گیری شده + فرض $S_{\parallel} = S_{\perp}$

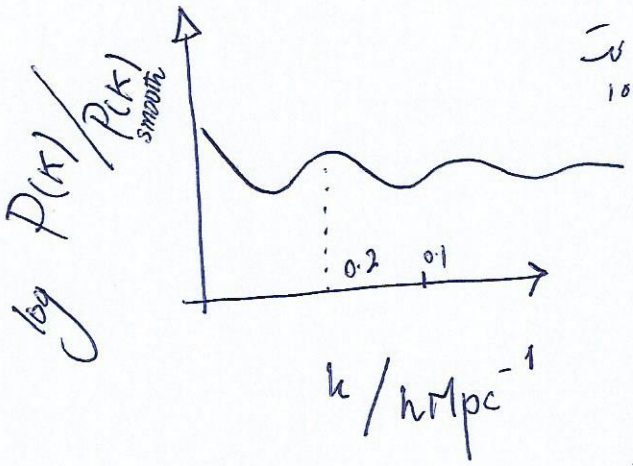
استفاده از تست AP قیدهای بر روی پارامترهای انرژی تاریک را بهبود می‌بخشد.

arXiv: 0910.5224

علاوه بر تست AP، می‌توان از ضخامت نوار و تابع همبستگی استفاده کرد.

9/

اگر در تابع همبستگی یک قله باشد با تبدیل فوریه در طیف توان به صورت نوسان به دست می‌آید.



در نمودار رویه رو نسبت طیف توان + نوسانات باریونی / طیف توان هموار شده به دست می‌آید.

$$P(k) = \int d^3r\, \xi_g(r) e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}}$$

assume: $\xi_g(r) = \bar{\xi}_g(r) + A\delta(r - r_*)$

$$\Rightarrow P(k) = \bar{P}(k) + A\xi_g(r_*) \underbrace{e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}_*}}_{\text{"نوسانی"}}$$

یکی دیگر از پارامترهای مفید برای مقید کردن پارامترهای کیهان شناسی حول کهکشان است که توسط Eisenstein et al. (2005) معرفی شده است.

$$D_V(z) = \left[(1+z)^2 D_A^2(z) \frac{cz}{H(z)} \right]^{1/3}$$

For reference cosmology $\Omega_m = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$, $h = 0.71$

$$D_V^{ref}(z = 0.276) = 1072.5\ Mpc$$

دلیل تعریف حجم کهکشان آن است که بتوان حجم ناحیه BAO را به صورت زیر تعریف کرد.

$$\left[\Delta\theta^2\, \Delta z \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{s(z_{rec})}{\left[(1+z)^2 d_A^2 \frac{c}{H(z)} \right]^{1/3}} \rightarrow \text{فاصله کهکشان (BAO از ما)}$$

The current constraint from SDSS data is

$D_V(z=0.35) = 1370 \pm 64$ Mpc at a redshift $z=0.35$

D.J. Eisenstein et al. [SDSS Collaboration] Astrophys. J. 633 (2005), 560.

$$r_{BAO}(z) \equiv \frac{s}{D_V(z)}$$

$r_{BAO}(z=0.2) = 0.1980 \pm 0.0058$, $r_{BAO}(z=0.35) = 0.1094 \pm 0.0033$

W.J. Percival et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 381 (2007), 1053.

$$s = \int_{z_{rec}}^{\infty} \frac{c_s\, dz}{H(z)}$$

This is the redshift at which baryons were released from Compton drag of photons

z_{drag}

Eisenstein & Hu, Astrophys. J. 496 (1998) 605.

$$z_{drag} = \frac{1291\, w_m^{0.251}}{1+0.659\, w_m^{0.828}} \left(1 + b_1 w_b^{b_2}\right)$$

$$w_m \equiv \Omega_m^0 h^2$$

$$w_b = \Omega_b^0 h^2$$

$$b_1 = 0.313\, w_m^{-0.419} \left(1+0.607\, w_m^{0.674}\right)$$

$$b_2 = 0.238\, w_m^{0.223}$$

در انتهای بخش I مربوط به BAO لازم به ذکر است که ۳ اثر باعث دشواری استخراج اطلاعات از این طیف‌نگاری استاندارد می‌شود.

۱- تحول غیرخطی شدن ساختارها باعث دوری از طیف توان (تابع همبستگی) خطی می‌شود.

۲- اثر الحاق فضای فاز: رصد کهکشان‌ها در راستای دید با انتقال به سرخ داده می‌شود و از آن جایی که سرعت خاصه کهکشان‌ها خود انتقال به سرخ ایجاد می‌کنند باعث ایجاد پیش‌بینی می‌شود.

۳- پارامتر میرایی (بایاس) طیف توان / تابع همبستگی دو نقطه‌ای با توزیع کهکشان‌ها داده می‌شود در حالی که پیش‌بینی نظری اول BAO برای ماده تاریک است. ارتباط بین توزیع ماده تاریک و ماده باریونی، میرایی است که خود باعث ایجاد پیش‌بینی می‌شود.

بررسی اثر هرکدام از ۳ مورد فوق موضوع تحقیقاتی برای فردا است تا اطلاعات دقیق‌تری از BAO به دست آوریم ماموریت‌هایی مانند EUCLID، WFIRST و LSST قصد اندازه‌گیری این کمیت را با دقت بیشتر و در انتقال به سرخ‌های بالاتری را دارند.

به عنوان مثال

Cosmology & fundamental physics with the Euclid satellite.

L. Amendola et al.

Living Rev. Relativity 16 (2013), 6

arXiv: 1206.1225