

Λ CDM: Успехи, проблемы и рекомендации

Л. Периволаропулос (Греция)

Реферат подготовил М.Х.Шульман (shulman@dol.ru)

arXiv:1104.0539v1 [astro-ph.CO] 4 Apr 2011

Λ CDM: Triumphs, Puzzles and Remedies

L. Perivolaropoulos

Department of Physics, University of Ioannina, Greece

E-mail: leandros@uoi.gr

Уровень согласия Λ CDM-модели с данными геометрических исследований в течение последнего десятилетия повысился. Несмотря на эти успехи, существуют некоторые загадочные расхождения между предсказаниями Λ CDM и данными динамических исследований (объемные потоки, направление и амплитуда низких мультиполей СМВ, направление векторов оптической поляризации квазаров, профили гало скоплений). Большинство из этих загадок связаны с существованием выделенных осей анизотропии, неправдоподобно близких одна к другой.

Результаты большого числа высокоточных космологических наблюдений (Hicken et al., 2009; Astier et al., 2006; Kowalski et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Reid et al., 2010), которые развивались в течение последних двух десятилетий, хорошо укладываются в класс космологических моделей, связанных с набором простых допущений:

- Вселенная однородна и изотропна в масштабах, превышающих несколько сотен Мпк.
- Общая теория относительности правильно описывает тяготение на всех макроскопических масштабах.
- Вселенная состоит из излучения (фотонов), материи (темной материи, барионов и лептонов) и темной энергии (субстанции с отталкивающими гравитационными свойствами, которая доминирует в недавние космологические эпохи и приводит к ускорению космического расширения (Copeland, Sami & Tsujikawa, 2006)).
- Первичные флуктуации, приводящие к образованию структуры, возникли как квантовые флуктуации в ходе приблизительно масштабно инвариантного процесса, происшедшего во время инфляции.

Простейшим представителем вышеуказанного класса является Λ CDM-модель (Sahni, 2002; Padmanabhan, 2003). В этой модели темная энергия представлена *космологической константой*, однородной формой энергии, плотность которой постоянна даже в расширяющемся пространстве. Это – *стандартная космологическая модель*, и она согласуется с преобладающим большинством космологических наблюдений. Наблюдения включают исследования геометрии (Hicken et al., 2009; Astier et al. 2006; Kowalski et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Reid et al., 2010) (прямые исследования крупномасштабной космической метрики) и динамические исследования (Bertschinger, 2006; Nesseris & Perivolaropoulos, 2008) крупномасштабной космической структуры, связанные с

одновременным изучением крупномасштабной космической метрики и гравитационного роста возмущений, т.е. тяготения в крупных масштабах.

Геометрические исследования космического расширения включают в себя следующее:

- Стандартные свечи в виде Сверхновых типа Ia (Snlа) (Hicken et al., 2009; Astier et al., 2006; Kowalski et al., 2008).
- Угловое местоположение первого пика на спектре мощности СМВ (Komatsu et al., 2009). Этот пик описывает темп интегрального космического расширения на основе использования поверхности последнего рассеяния в качестве стандартного эталона длины.
- Барионные акустические колебания плотности материи, проявляющиеся в спектре мощности. Эти колебания также описывают темп интегрального космического расширения на небольших красных смещениях на основе использования поверхности последнего рассеяния в качестве стандартного эталона длины (Reid et al., 2010).
- Другие менее точные стандартные свечи (гамма-всплески (Basilakos & Perivolaropoulos, 2008), HII галактики (Plionis et al., 2009)) и стандартные эталоны длины (массовое отношение для газовых скоплений (Allen et al., 2004) также как исследования в области возраста Вселенной (Krauss & Chaboyer, 2003).

Динамические исследования космического расширения и закона гравитации в космологических масштабах включают в себя следующее:

- Рентгеновские данные о росте скоплений (Rapetti et al., 2008).
- Спектр мощности линий поглощения Лайман-альфа при различных красных смещениях (McDonald et al., 2005; Nesseris & Perivolaropoulos, 2008).
- Искажение красного смещения, наблюдаемое через анизотропную картину галактических красных смещений в масштабе скоплений (Hawkins et al., 2003)
- Обзоры по слабому линзированию (Benjamin et al., 2007; Amendola, Kunz & Sapone, 2008)

Эти космологические наблюдения показывают, что простейшая модель, хорошо описывающая темп космического расширения, соответствует космологической константе (Padmanabhan, 2003) именно в плоском пространстве

$$H(z)^2 = H_0^2 \left[\Omega_{0m}(1+z)^3 + \Omega_\Lambda \right] \quad (1)$$

где $H(z)$ – темп расширения Хаббла при красном смещении z , $H_0 = H(z = 0)$, Ω_{0m} – плотность материи в настоящую эпоху, нормированная на текущее значение критической плотности материи, отвечающей плоской метрике, $\Omega_\Lambda = (1 - \Omega_{0m})$ – нормированная плотность темной энергии, которая в простейшем случае космологической постоянной (Λ CDM) не зависит от времени.

Закономерен следующий вопрос: существуют ли данные, которые бросают вызов текущей стандартной модели (Λ CDM) и каковы их общие свойства? На этот вопрос можно ответить утвердительно. Все эти противоречащие Λ CDM данные могут быть подытожены в таб. 1, где показаны направления выделенных осей по данным, приведенным в соответствующей литературе. Эти направления показаны также на рис. 1 в галактических координатах. Несложно показать (Antoniou &

Perivolaropoulos, 2010), что вероятность подобной близости осей в случае их относительной независимости составляет менее 1%.

Таблица 1

Направления выделенных осей по данным различных космологических обследований.

Космологические наблюдения	<i>l</i> (градусы)	<i>b</i> (градусы)	Ссылка
Sn Ia Union2	309	18	(Antoniou & Perivolaropoulos, 2010)
Диполь CMB	264	48	(Lineweaver et. al., 1996)
Потоки скоростей	282	6	(Watkins, Feldman & Hudson 2009)
Ориентация квазаров	267	69	(Hutsemekers et. al., 2005)
Октуполь CMB	308	63	(Bielewicz, Gorski & Banday, 2004)
Квадруполь CMB	240	63	(Bielewicz, Gorski & Banday, 2004)
Усредненное	278 ± 26	45 ± 27	

Шесть выделенных осей в галактических координатах + усредненное направление (вид северной и южной полусфер карты небосвода)

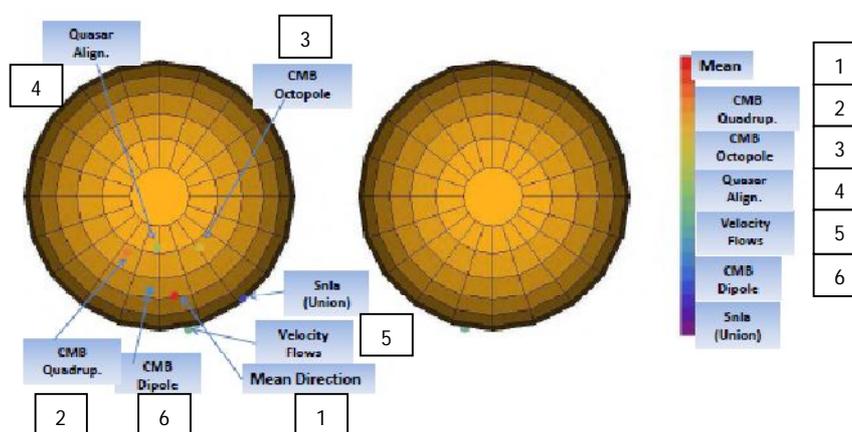


Рисунок 1.

Все точки, на которые направлены выделенные оси из таб. 1, сосредоточены в области, занимающей меньше четверти северной галактической полусферы небесной карты (слева). Южная полусфера (справа) представлена из соображений полноты (на ней также можно видеть направление объемного потока, потому что оно близко к экватору). Показано также усредненное направление из таб. 1.

1—усредненное направление; 2—квадруполь CMB; 3—октуполь CMB; 3 – ориентация квазаров; 5 – потоки скоростей; 6 – диполь CMB.

Если не обнаружится общая скрытая систематическая ошибка (Peiris & Smith, 2010), существование космологической выделенной оси может быть связано с определенными физическими эффектами. Неполный перечень таких эффектов приведен ниже:

- Анизотропное уравнение состояния темной энергии (Zumalacarregui et. al., 2010; Koivisto & Mota, 2006; Battye & Moss, 2009), обусловленное, возможно, существованием векторных полей (Armendariz-Picon, 2004; Esposito-Farese, Pitrou & Uzan, 2010).
- Возмущения темной энергии и/или темной материи в масштабах, сравнимых с масштабом горизонта (Rodrigues, 2008; Jimenez & Maroto, 2009). Например, некоторый нецентральный наблюдатель в войде 1 гпк будет наблюдать выделенную космологическую ось в метрике Лемэтра-Толмана-Бонди (Alexander et. al., 2009; Garcia-Bellido & Haugboelle, 2008; Dunsby et. al., 2010; Garfinkle, 2010).
- Образование турбулентной структуры могло бы также привести к крупномасштабным негауссовым свойствам, которые приводят к существованию выделенных осей (Schild & Gibson, 2008).
- Отклонения от темпа изотропного космического расширения, индуцированные фундаментальным нарушением космологического принципа, например, через множественно связанную нетривиальную космологическую топологию (Luminet, 2008), вращающуюся вселенную, связанную с некоторым анизотропным скалярным полем (Carneiro & Mena Marugan, 2001), некоммутативную геометрию (Akofo et. al., 2008) или просто фундаментальную анизотропную кривизну (Koivisto et. al., 2011).
- Статистические анизотропные первичные возмущения (Armendariz-Picon, 2007; Pullen & Kamionkowski, 2007; Ackerman, Carroll & Wise 2007). Например, инфляционные возмущения, индуцированные векторными полями (Dimopoulos et. al., 2009; Bartolo et. al., 2009). Заметим, однако, что инфляционные модели с векторными полями обычно приводят к существованию фантомов (ghosts) (Himmeloglu, Contaldi & Peloso, 2009).
- Существование крупномасштабного первичного магнитного поля (Kahniashvili, Lavrelashvili & Ratra, 2008; Barrow, Ferreira & Silk, 1997; Campanelli, 2009). Свидетельства существования такого магнитного поля были недавно выявлены на картах CMB (Kim & Naselsky, 2009).

Подтверждение существования космологических выделенных осей может оказаться прорывом в космологических исследованиях, в результате чего может возникнуть новая физика.

Ссылки

- Ackerman, L., Carroll, S. M. and Wise, M. B. (2007). Imprints of a Primordial Preferred Direction on the Microwave Background. *Phys. Rev. D* **75**, 083502 [Erratum-ibid. *D* **80**, 069901 (2009)].
- Akofo, E., Balachandran, A. P., Jo, S. G., Joseph, A. and Qureshi, B. A. (2008). Direction-Dependent CMB Power Spectrum and Statistical Anisotropy from Noncommutative Geometry. *JHEP* **0805**, 092.
- Alexander, S., Biswas, T., Notari A. and Vaid, D. (2009). Local Void vs Dark Energy: Confrontation with WMAP and Type Ia Supernovae. *JCAP* **0909**, 025.
- Allen, S. W., Schmidt, R. W., Ebeling, H., Fabian A. C. and van Speybroeck, L. (2004). Constraints on dark energy from Chandra observations of the largest relaxed galaxy clusters. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **353**, 457.
- Amendola, L., Kunz M. and Sapone D. (2008). Measuring the dark side (with weak lensing). *JCAP* **0804**, 013.

- Antoniou, I. and Perivolaropoulos, L. (2010). Searching for a Cosmological Preferred Axis: Union2 Data Analysis and Comparison with Other Probes. *JCAP* **1012**, 012.
- Armendariz-Picon, C. (2004). Could dark energy be vector-like? *JCAP* **0407**, 007.
- Armendariz-Picon, C. (2007). Creating Statistically Anisotropic and Inhomogeneous Perturbations. *JCAP* **0709**, 014.
- Astier, P. *et al.* [The SNLS Collaboration] (2006). The Supernova Legacy Survey: Measurement of Ω_M , Ω_{Λ} and from the First Year Data Set. *Astron. Astrophys.* **447**, 31.
- Barrow, J. D., Ferreira P. G. and Silk, J. (1997). Constraints on a Primordial Magnetic Field. *Phys. Rev. Lett.* **78**, 3610.
- Bartolo, N., Dimastrogiovanni, E., Matarrese S. and Riotto, A. (2009). Anisotropic bispectrum of curvature perturbations from primordial non-Abelian vector fields. *JCAP* **0910**, 015.
- Basilakos S. and Perivolaropoulos L. (2008). Testing GRBs as Standard Candles. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **391**, 411.
- Battye, R. and Moss, A. (2009). Anisotropic dark energy and CMB anomalies. *Phys. Rev. D* **80**, 023531.
- Benjamin, J. *et al.* (2007). Cosmological Constraints From the 100 Square Degree Weak Lensing Survey. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **381**, 702.
- Bertschinger, E. (2006). On the Growth of Perturbations as a Test of Dark Energy. *Astrophys. J.* **648**, 797.
- Bielewicz, P., Gorski K. M. and Banday, A. J. (2004). Low order multipole maps of CMB anisotropy derived from WMAP. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **355**, 1283.
- Broadhurst, T. J., Takada, M., Umetsu, K., Kong, X., Arimoto, N., Chiba, M. and Futamase, T. (2005). The Surprisingly Steep Mass Profile of Abell 1689, from a Lensing Analysis of Subaru Images. *Astrophys. J.* **619**, L143.
- Campanelli, L. (2009). A Model of Universe Anisotropization. *Phys. Rev. D* **80**, 063006.
- Carneiro S. and Mena Marugan, G. A. (2001). Anisotropic cosmologies containing isotropic background radiation. *Phys. Rev. D* **64**, 083502.
- Copeland E. J., Sami M. and Tsujikawa S. (2006). Dynamics of dark energy. *Int. J. Mod. Phys. D* **15**, 1753.
- Copi, C. J., Huterer, D., Schwarz, D. J. and Starkman G. D. (2006). On the large-angle anomalies of the microwave sky. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **367**, 79.
- Copi, C., Huterer, D., Schwarz D. and Starkman, G. (2007). The Uncorrelated Universe: Statistical Anisotropy and the Vanishing Angular Correlation Function in WMAP Years 1-3. *Phys. Rev. D* **75**, 023507.
- Copi, C. J., Huterer, D., Schwarz D. J. and Starkman, G. D. (2010). Large-angle anomalies in the CMB. *Adv. Astron.* **2010**, 847541.
- Dimopoulos, K., Karciauskas, M., Lyth D. H. and Rodriguez, Y. (2009). Statistical anisotropy of the curvature perturbation from vector field perturbations. *JCAP* **0905**, 013.
- Dunsby, P., Goheer, N., Osano, B. and Uzan, J. P. (2010). How close can an Inhomogeneous Universe mimic the Concordance Model? *JCAP* **1006**, 017.
- Efstathiou, G., Sutherland, W. J. and Maddox, S. J. (1990). The cosmological constant and cold dark matter. *Nature* **348**, 705.
- Esposito-Farese, G., Pitrou C. and Uzan, J. P. (2010). Vector theories in cosmology. *Phys. Rev. D* **81**, 063519.

- Garcia-Bellido J. and Haugboelle, T. (2008). Confronting Lemaitre-Tolman-Bondi models with Observational Cosmology. *JCAP* **0804**, 003.
- Garfinkle, D. (2010). The motion of galaxy clusters in inhomogeneous cosmologies. *Class. Quant. Grav.* **27** 065002.
- Gentile, G., Salucci, P., Klein, U., Vergani, D. and Kalberla, P. (2004). The cored distribution of dark matter in spiral galaxies. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **351**, 903.
- Gorski K. M., Hansen F. K. and Lilje, P. B. (2007). Hemispherical power asymmetry in the three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe sky maps. *Astrophys. J.* **660**, L81.
- Hawkins, E. *et al.* (2003). The 2dF Galaxy Redshift Survey: correlation functions, peculiar velocities and the matter density of the Universe. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **346**, 78.
- Hicken, M. *et al.* (2009). Improved Dark Energy Constraints from 100 New CfA Supernova Type Ia Light Curves. *Astrophys. J.* **700**, 1097.
- Himmetoglu, B., Contaldi C. R., and Peloso, M. (2009). Instability of anisotropic cosmological solutions supported by vector fields. *Phys. Rev. Lett.* **102**, 111301.
- Hutsemekers, D., Cabanac, R., Lamy, H. and Sluse, D. (2005). Mapping extreme-scale alignments of quasar polarization vectors. *Astron. Astrophys.* **441**, 915.
- Jimenez J. B., and Maroto, A. L. (2009). Large-scale cosmic flows and moving dark energy. *JCAP* **0903**, 015.
- Kahniashvili, T., Lavrelashvili G. and Ratra, B. (2008). CMB Temperature Anisotropy from Broken Spatial Isotropy due to an Homogeneous Cosmological Magnetic Field. *Phys. Rev. D* **78**, 063012.
- Kashlinsky A., Atrio-Barandela, F., Kocevski, D., and Ebeling H. (2009). A measurement of large-scale peculiar velocities of clusters of galaxies: results and cosmological implications. *Astrophys. J.* **686**, L49.
- Kim J. and Naselsky, P. (2009). Alfven turbulence in the WMAP 5 year data and a forecast for the PLANCK. *JCAP* **0907**, 041.
- Klypin, A. A., Kravtsov, A. V., Valenzuela, O. and Prada, F. (1999). Where are the missing galactic satellites? *Astrophys. J.* **522**, 82.
- Koivisto T. and Mota, D. F. (2006). Dark Energy Anisotropic Stress and Large Scale Structure Formation. *Phys. Rev. D* **73**, 083502.
- Koivisto, T. S., Mota, D. F., Quartin M. and Zlosnik, T. G. (2011). On the Possibility of Anisotropic Curvature in Cosmology. *Phys. Rev. D* **83**, 023509.
- Komatsu E. *et al.* [WMAP Collaboration] (2009). Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation. *Ap.J. Suppl.* **180**, 330.
- Kovetz, E. D., Ben-David, A. and Itzhaki, N. (2010). Giant Rings in the CMB Sky. *Astrophys. J.* **724**, 374.
- Kowalski, M. *et al.* (2008). Improved Cosmological Constraints from New, Old and Combined Supernova Datasets. *Astrophys. J.* **686**, 749.
- Krauss, L. M. and Chaboyer, B. (2003). Age Estimates of Globular Clusters in the Milky Way: Constraints on Cosmology. *Science* **299**, 65.
- Land, K. and Magueijo, J. (2005). The axis of evil. *Phys. Rev. Lett.* **95**, 071301 (2005).
- Lavaux, G. Tully, R. B., Mohayaee, R. and Colombi, S. (2010). Cosmic flow from 2MASS redshift survey: The origin of CMB dipole and implications for LCDM cosmology. *Astrophys. J.* **709**, 483.
- Lineweaver, C. H., Tenorio, L., Smoot, G. F., Keegstra, P., Banday, A. J. and Lubin, P. (1996). The Dipole Observed in the COBE DMR Four-Year Data. *Astrophys. J.* **470**, 38.

- Longo, M. J. (2009). Evidence for a Preferred Handedness of Spiral Galaxies. arXiv:0904.2529.
- Luminet, J. P. (2008). The Shape and Topology of the Universe. arXiv:0802.2236 [astro-ph].
- McDonald, P. *et al.* [SDSS Collaboration] (2005). The Linear Theory Power Spectrum from the Lyman-alpha Forest in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys. J.* **635**, 761.
- Nesseris, S. and Perivolaropoulos, L. (2008). Testing LCDM with the Growth Function $\delta(a)$: Current Constraints. *Phys. Rev. D* **77**, 023504.
- Padmanabhan, T (2003). Cosmological constant: The weight of the vacuum. *Phys. Rept.* **380**, 235.
- Peiris H. V. and Smith, T. L. (2010). CMB Isotropy Anomalies and the Local Kinetic Sunyaev-Zel'dovich Effect. *Phys. Rev. D* **81**, 123517.
- Perivolaropoulos, L. (2008). Six Puzzles for LCDM Cosmology. Invited article to the TSPU anniversary volume "The Problems of Modern Cosmology" on the occasion of the 50th birthday of Prof. S. D. Odintsov. arXiv:0811.4684.
- Perlmutter S. *et al.* [Supernova Cosmology Project Collaboration] (1999). Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. *Astrophys. J.* **517**, 565.
- Plionis, M., Terlevich, R., Basilakos, S., Bresolin, F., Terlevich, E., Melnick, J. and Georgantopoulos, I. (2009). Alternative High-z Cosmic Tracers and the Dark Energy Equation of State. *J. Phys. Conf. Ser.* **189**, 012032.
- Pullen A. R. and Kamionkowski, M. (2007). Cosmic Microwave Background Statistics for a Direction-Dependent Primordial Power Spectrum. *Phys. Rev. D* **76**, 103529.
- Quartin M. and Amendola, L. (2010). Distinguishing Between Void Models and Dark Energy with Cosmic Parallax and Redshift Drift. *Phys. Rev. D* **81**, 043522.
- Rapetti, D., Allen, S. W., Mantz A. and Ebeling, H. (2008). Constraints on modified gravity from the observed X-ray luminosity function of galaxy clusters. arXiv:0812.2259 [astro-ph].
- Reid B. A. *et al.* [SDSS Collaboration] (2010). Baryon Acoustic Oscillations in the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 Galaxy Sample. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **401**, 2148.
- Rodrigues, D. C. (2008). Anisotropic Cosmological Constant and the CMB Quadrupole Anomaly. *Phys. Rev. D* **77**, 023534.
- Sahni, V. (2002). The cosmological constant problem and quintessence. *Class. Quant. Grav.* **19**, 3435.
- Schild R. E. and Gibson C. H. (2008). Goodness in the Axis of Evil. arXiv:0802.3229 [astro-ph].
- Tegmark, M., de Oliveira-Costa, A. and Hamilton A. (2003). A high resolution foreground cleaned CMB map from WMAP. *Phys. Rev. D* **68**, 123523.
- Tsagas, C. G. (2010). Large-scale peculiar motions and cosmic acceleration. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **405**, 503.
- Umetsu, K. and Broadhurst, T. (2008). Combining Lens Distortion and Depletion to Map the Mass Distribution of A1689. *Astrophys. J.* **684**, 177.
- Watkins, R., Feldman, H. A. and Hudson, M. J. (2009). Consistently Large Cosmic Flows on Scales of 100 Mpc/h: a Challenge for the Standard LCDM Cosmology. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **392**, 743.
- Zumalacarregui, M., Koivisto, T. S., Mota, D. F. and Ruiz-Lapuente, P. (2010). Disformal Scalar Fields and the Dark Sector of the Universe. *JCAP* **1005**, 038.