

Нобеловата награда по физика за 2006 година

Космология и космическото микровълново лъчение
Космология и космическото микровълново лъчение.

Според стандартния космологичен модел за Големия взрив възрастта на Вселената е приблизително 13,7 милиарда години. По онова време тя е била във висша степен хомогенно състояние, извънредно гореща и плътна, изпълнена с елементарни частици и много бързо разширяваща се. Приблизително 380 000 години след Големия взрив енергията на фотоните намалява дотолкова, че те вече не могат да йонизират водородните атоми. Следователно фотоните се “разделят” от другите частици и започват да се движат през Вселената по същество безпрепятствено. От тогава Вселената се разширява и охлажда в присъствието на един остатък от своето горещо минало – Космическото Микровълново Лъчение (КМЛ). Днес ние го наблюдаваме като топлинно лъчение от абсолютно черно тяло с температура 2,7 К, което изпълва цялата Вселена. Наблюденията на КМЛ дават уникална и подробна информация за ранната Вселена, допринасяйки по такъв начин за превръщане на космологията в точна наука. Наистина, както ще бъде изложено по-подробно нататък, регистрираният спектър на КМЛ вероятно представлява спектъра, най-точно съответстващ на спектъра на абсолютно черно тяло. Като се абстрахираме от диполната анизотропия, която най-вероятно се дължи на движението ни във Вселената, КМЛ е изотропно с точност 1:100 000. Нобеловата награда по физика за 2006 година е за резултатите от наблюденията на КМЛ, проведени със спътника COBE (Cosmic Background Explorer – изследовател на космическия фон).

Ранни изследвания

Откриването на космическото микровълново фоново лъчение има необикновена и интересна история. Както основните теории, така и необходимите експериментални техники бяха налице много преди опитното откритие през 1964 година. Теорията на разширяващата се Вселена бе предложена първо от Фридман (1922 г.) и Леметр (1927 г.) Отлична равностметка на тези работи даде Нобеловият лауреат Стивън Вайнберг (1993 г.).

Около 1960 г., няколко години преди откритието, се обсъждаха два сценария за развитието на Вселената: дали тя се разширява в съответствие с модела за Големия взрив, или е стационарна. И двата модела имаха своите поддръжници и между учените, които поддържаха втория бе Ханс Алфвен (Нобелова награда по физика за 1970 г.), Фред Хойл и Денис Сциама. Ако моделът на Големия взрив е правилен, би трябвало да съществува отпечатък от лъчението, доминиращо ранната Вселена и няколко групи се занимаваха да го търсят. Това лъчение би трябвало да бъде топлинно, т.е. като от абсолютно черно тяло, и изотропно.

Откриването на космическия микровълнов фон от Пензиас и Уилсън през 1964 г. (Penzias and Wilson 1965, Penzias 1979, Wilson 1979, Dicke et al. 1965) бе пълна изненада за тях, тъй като те търсеха източника за неочаквания шум в техния радиоприемник (за това откритие те споделиха помежду си Нобеловата награда по физика за 1978 г.). Лъчението предизвикваше неочакван шум в техните радиоприемници. Около 16 години преди това Алфер, Гамов и Херман (Alpher and Herman 1949, Gamow 1946) бяха предсказали, че Вселената би трябвало да бъде пронизана от реликтовото лъчисто поле. Още през 1934 г. Толман (Tolman 1934) бе показал, че охлаждащото се лъчение от

абсолютно черно тяло запазва формата на своя спектър. Изглежда нито Алфер, нито Гамов или пък Херман бяха успели да убедят експериментаторите да използват тази форма като белег, по който да открият лъчението. През 1964 г. обаче Дорошкевич и Новиков (Doroshkevich and Novikov 1964) публикуваха статия, в която явно предлагат търсенето на лъчението да се съсредоточи върху неговите характеристики като лъчение от абсолютно черно тяло. Трябва да се отбележи, че някои измервания още от 1940 г. показваха необходимостта от радиационно поле, с което да се обяснят преходите между енергетичните нива в молекулите в междузвездното пространство (McKellar 1941). След откриването на КМЛ през 1964 г. много, но не всички, от поддръжниците на стационарния модел се предадоха и приеха модела на Големия взрив. Ранните теоретични работи се обсъждат в работите на Alpher, Herman и Gamow (1967), Penzias (1979), Wilkinson и Peebles (1983), Weinberg (1993), и Herman (1997).

След откритието от 1964 г. бяха направени няколко независими измервания на лъчението от Уилкинсън и други, като бяха използвани инструменти, носени от балони, от ракети, или разположени на земята. Максимумът на интензитета на лъчението е при дължина на вълната около 1 mm, където поглъщането в атмосферата е силно. Въпреки че повечето резултати потвърждаваха, че формата на лъчението е като на абсолютно черно тяло, все пак имаше твърде малко измервания за честоти, по-високи от честотата на максимума (съотв. – за по-малки дължини на вълните). Някои измервания даваха резултати, показващи значителни отклонения от формата на спектъра на абсолютно черно тяло (Matsumoto et al. 1988).

Очакваше се, че КМЛ ще бъде във висока степен изотропно. За да се обяснят обаче днес наблюдаваните голямо мащабни структури във формата на галактиките, както и купове от галактики, би трябвало да се наблюдават и малки неизотропности. Гравитацията може да предизвика в ранната Вселена малки флуктуации в плътността, които да нараснат и направят възможно формирането на галактики. Едно много важно и подробно релятивистично пресмятане на Сакс и Волф показва как триизмерните флуктуации на плътността могат да предизвикат двумерна температурна анизотропия в големи ъгли ($> 1^\circ$) на КМЛ (Sachs and Wolfe 1967).

Тъй като Земята се движи спрямо КМЛ, очаква се определена диполна температурна анизотропия от порядъка на $\Delta T/T = 10^{-3}$. Това бе отбелязано през 70-те години (Conklin 1969, Henry 1971, Corey and Wilkinson 1976, Smoot, Gorenstein and Muller 1977). Тогава се предполагаше, че анизотропията е от порядъка на $10^{-2} - 10^{-4}$, но не бе наблюдавана експериментално. Когато пък през 80-те години бе взето предвид наличието на тъмна материя, предсказваните равнища на флуктуациите бяха снижени до около 10^{-5} , което вече представляваше голямо предизвикателство пред експериментаторите.

Мисията COBE

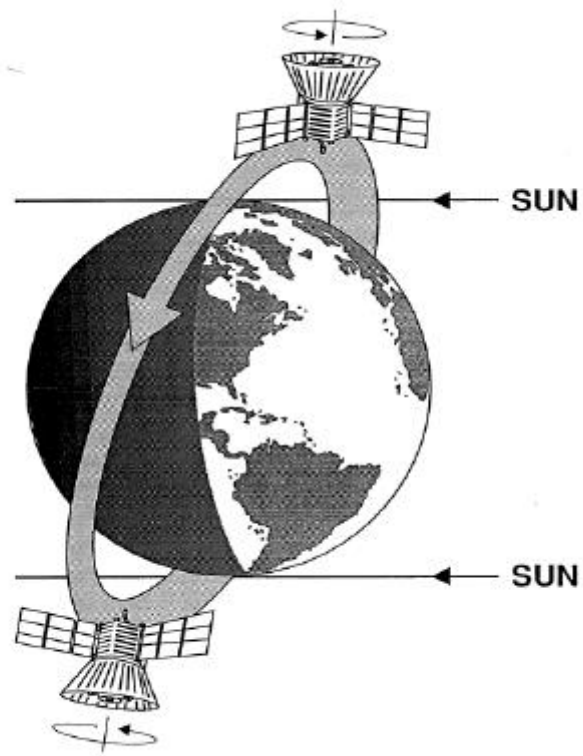
Отдавна бе осъзнато, че поради поглъщането от атмосферата например, измерванията във високочестотната част на спектъра на КМЛ (дължини на вълната по-къси от 1 mm) трябва да се правят от космичното пространство. Един инструмент, разположен на спътник, покрива цялото небе и дава възможност за продължителни наблюдения. Последното е важно за намаляване на систематичните грешки в измерванията върху лъчението. Подробен отчет за измерванията на КМЛ е даден в обзора на Weiss (1980).

Историята на COBE започва през 1974 г., когато НАСА съобщи за възможността за малки астрономични експерименти. След дълги преговори с ръководството на НАСА проектът COBE се роди и накрая, на 18 ноември, 1989 г., спътникът COBE бе успешно

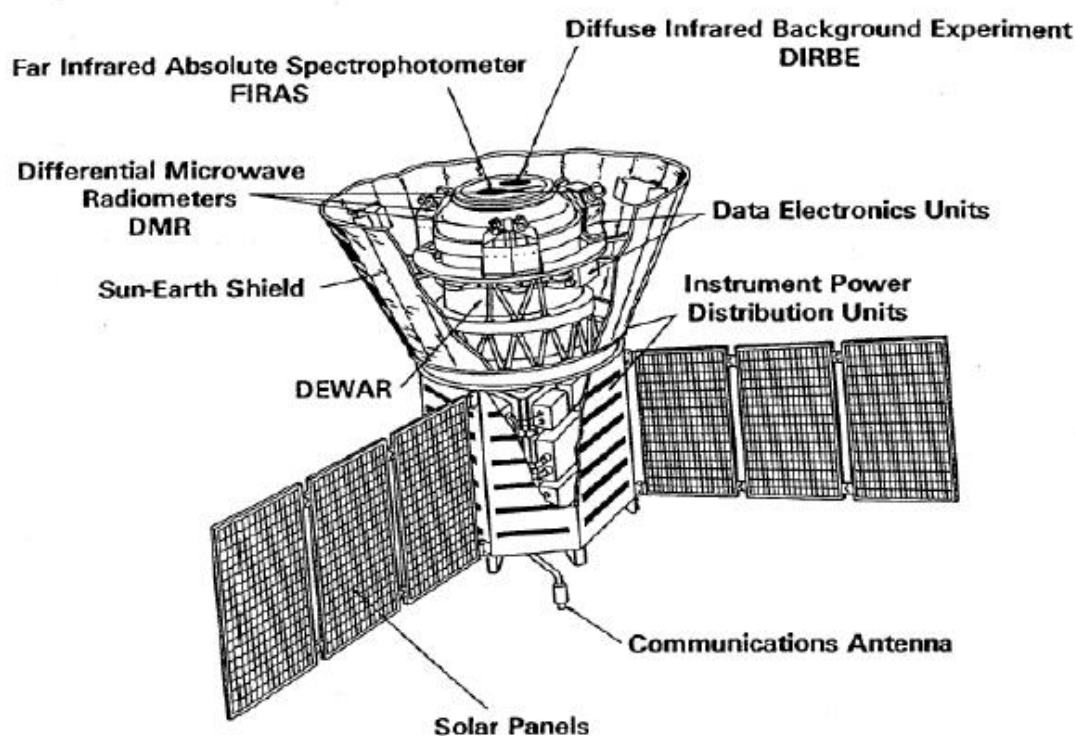
изведен в орбита. Повече от 1000 учени, инженери и администратори бяха ангажирани в мисията. На COBE имаше три инструмента, покриващи вълновите обхвати от 1 μm до 1 cm за измерване на анизотропията и спектъра на КМЛ, както и дифузното инфрачервено фоново лъчение: DIRBE (Diffuse InfraRed Background Experiment), DMR (Differential Microwave Radiometer) и FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer). Задачата на COBE бе да измери КМЛ по цялото небе, което бе възможно от избраната орбита за спътника. Всички предишни наземни измервания покриваха само ограничени части от небето. Джон Мадър бе главен изследовател и ръководител на проекта от самото начало. Той отговаряше също така за инструмента FIRAS. Джордж Смуут бе главен отговорник за DMR, а Майк Хаузер – за DIRBE.

Задачата на DMR бе да търси анизотропност на КМЛ на три дължини на вълната – на 3 mm, 6 mm, и 10 mm, с разделителна способност около 7° . Анизотропностите, от които се очакваше да обяснят голямомасштабните структури във Вселената, трябваше да се наблюдават между области, покриващи големи ъгли. Задачата на FIRAS бе да измери спектралното разпределение на КМЛ в обхвата 0,1 – 10 mm и да го сравнява с формата на спектъра на абсолютно черно тяло, очаквана според модела на Големия взрив, която е различна, например от формата, очаквана от светлината от звездите или спирачното лъчение. За DIRBE целта бе да измери инфрачервеното фоново лъчение. Мисията, спътникът и инструментите са подробно описани от Vogges et al. 1992. Фигури 1 и 2 показват орбитата на COBE и съответно – спътника.

COBE бе един успех. Всички инструменти работиха много добре и резултатите, специално тези от DMR и FIRAS, допринесоха забележимо за превръщането на космологията в точна наука. Предсказанията на модела на Големия взрив бяха потвърдени: бяха открити температурни флуктуации от порядъка на 10^{-5} и бе показано, че спектърът на КМЛ е абсолютно точно като спектъра на абсолютно черно тяло с температура 2,725 K. DIRBE направи важни наблюдения на инфрачервения фон. Съобщението за откриване на анизотропиите бе посрещнато с голям ентузиазъм по целия свят.



Фиг. 1: Схематичен вид на орбитата на COBE около Земята. Височината на орбитата бе 900 km. Оста на въртене е приблизително на 90° спрямо посоката към Слънцето. (От Vogges et al. 1992).



Фиг. 2: Спътникът COBE и трите инструмента DIRBE, DMR и FIRAS.

Широчината със слънчевите панели е 8,5 m, височината 5,5 m, а масата 2300 kg. FIRAS и DIRBE се охлаждаат до 1,8 K с помощта на течен хелий. (От Vogges et al. 1992)

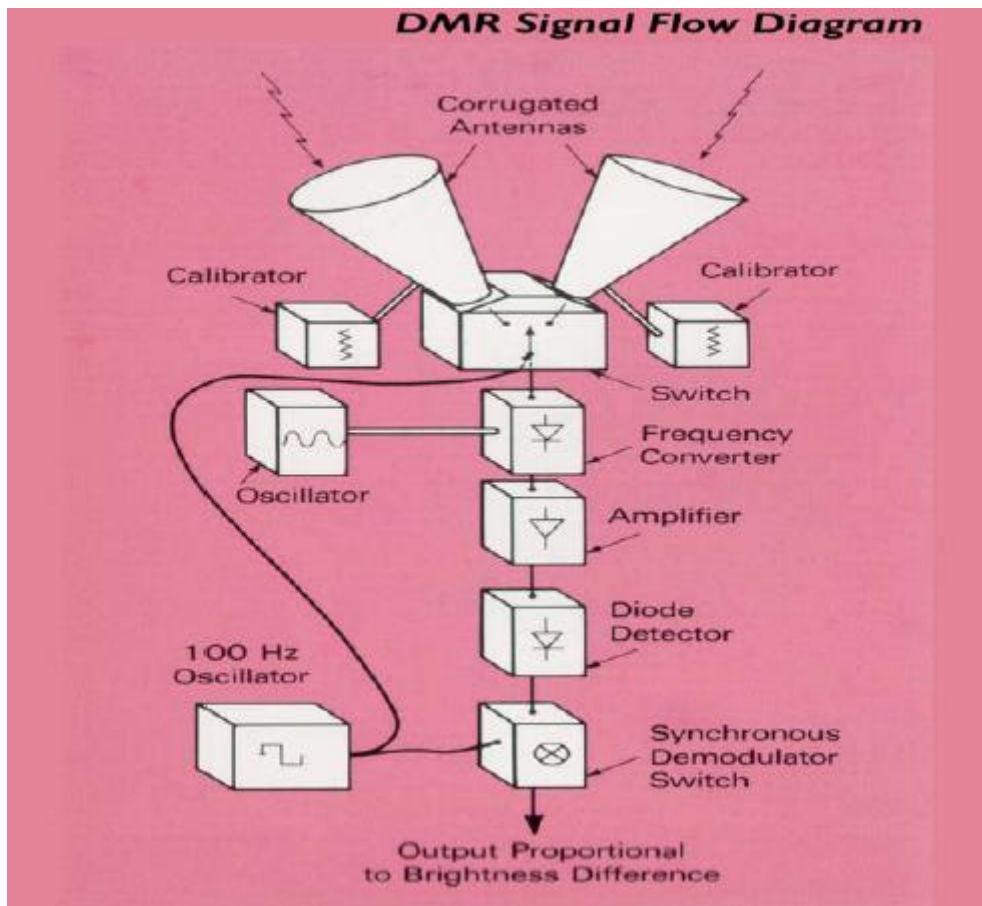
DMR събираше лъчение чрез гофрирани (???) рупорни антени, насчени към части от небето, разделени от ъгъл 60°. Диференциални микровълнови радиометри мереха разликата в яркостта в тези две посоки (вж. Dicke 1946). Потоците от сигнали към DMR са показани на фиг. 3. Подробен отчет за инструмента DMR може да се намери в Smoot et al. 1990.

FIRAS има два отделни интерферометра, измерващи разликата между сигнала от небето и един борден калибратор за абсолютно черно тяло (Mather 1982). Потокът на лъчението се събира от един разширяващ се рупор. Диаграмата на пътя във FIRAS е показана на фиг. 4.

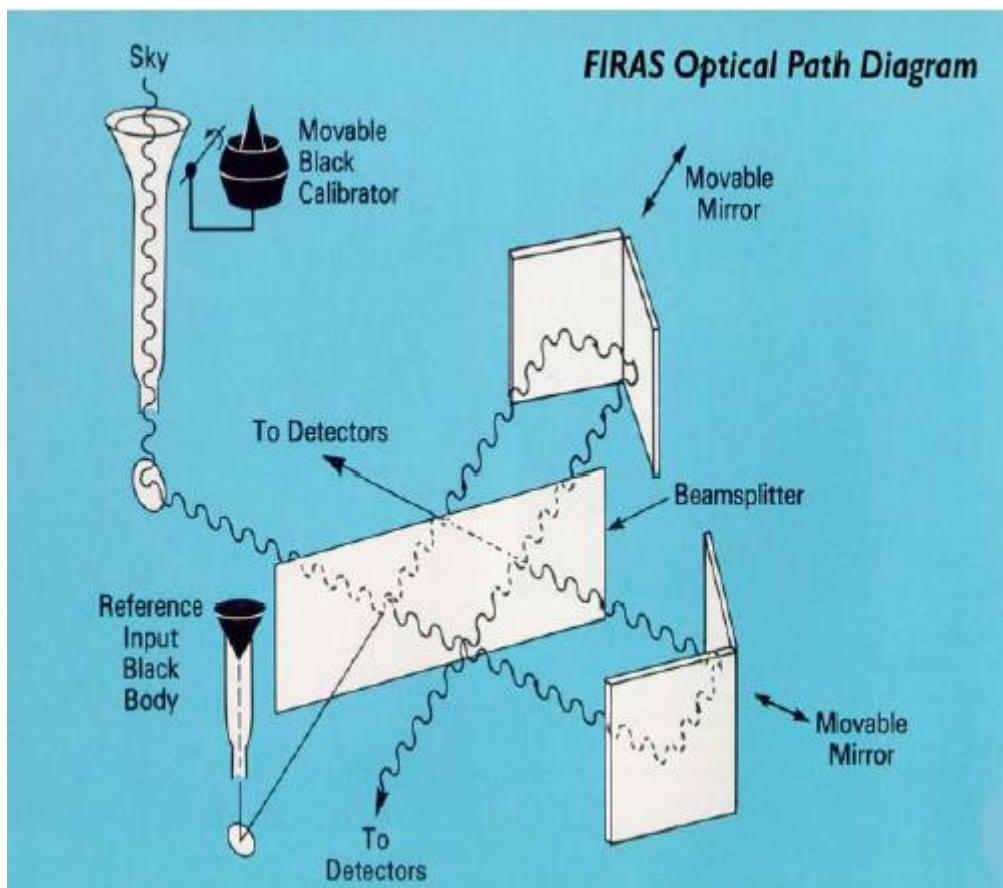
Анизотропии

Инструментът DMR (Smoot et al. 1990) измерва температурни флукуации от порядъка на 10^{-5} за трите честоти на КМЛ 90, 53 и 31,5 GHz (дължини на вълните 3,3, 5,7 и 9,5 mm), избрани около максимума на интензитета на КМЛ и където галактичният фон е нисък. Ъгловата разделителна способност бе около 7°. След внимателно отстраняване на инструменталния фон, данните показаха един фонов принос от Млечния път, познатата диполна амплитуда $\Delta T/T = 10^{-3}$, предизвикана вероятно от движението на Земята спрямо КМЛ, и една значителна и дълго търсена квадруполна амплитуда, предсказана през 1965 г. от Сакс и Волф. Първите резултати бяха

публикувани през 1992 г.. Данните показаха мащабна инвариантност за големи ъгли, което е в съответствие с предсказанията на инфлационните модели.

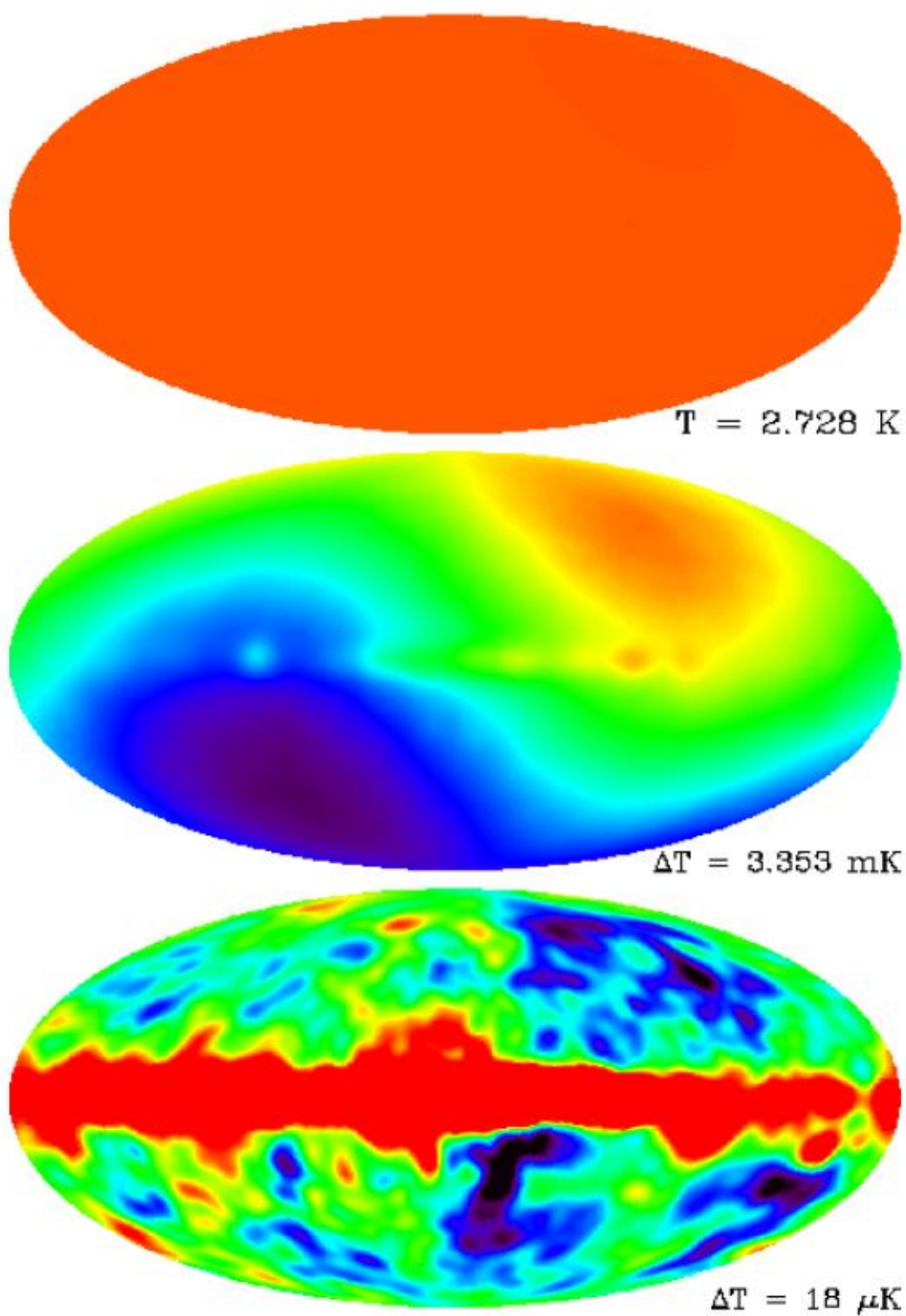


Фиг. 3: Диаграма на потоците на сигналите в DMR. Имало е 6 диференциални радиометра, по два за всяка дължина на вълната. Детекторите на всяка двойка са насочени под ъгъл 60° един към друг. (От lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/.)



Фиг. 4: Диаграма на оптичния път във FIRAS. (От mbda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/.)

Фиг. 5 показва измерените температурни флуктуации в галактични координати – една фигура, която се появи в малко различаващи се форми в много списания. RMS космическата квадруполна амплитуда бе оценена на $13 \pm 4 \mu\text{K}$ ($\Delta T/T = 5 \times 10^{-6}$) със систематична грешка най-много $3 \mu\text{K}$ (Smoot et al. 1992). Анизотропиите от DMR бяха сравнени и бе установено, че са в съгласие с моделите на Wright et al. 1992 за формиране на структурите. Пълните четиригодишни наблюдения от DMR бяха публикувани през 1996 г. (вж. Bennett et al. 1996). Резултатите на COBE скоро бяха потвърдени от известен брой експерименти, проведени на балони, и още по-скоро, от изведения в орбита през 2001 г. спътник WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), осигуряващ разделителна способност от 1° (Bennett et al. 2003).



Фиг. 5: Резултатите от DMR (Smoot et al. 1992, <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>) в галактични координати (хоризонтално – дължина от $+180^\circ$ до -180° , вертикално – широчина от $+90^\circ$ до -90° , центрирано приблизително в центъра на Млечния път). Данните от диапазона 53 GHz (дължина на вълната 6 mm) показват приблизителна еднородност на КМЛ (горе), диполната анизотропия (в средата) и квадруполната и по-високите анизотропии с извадена диполната

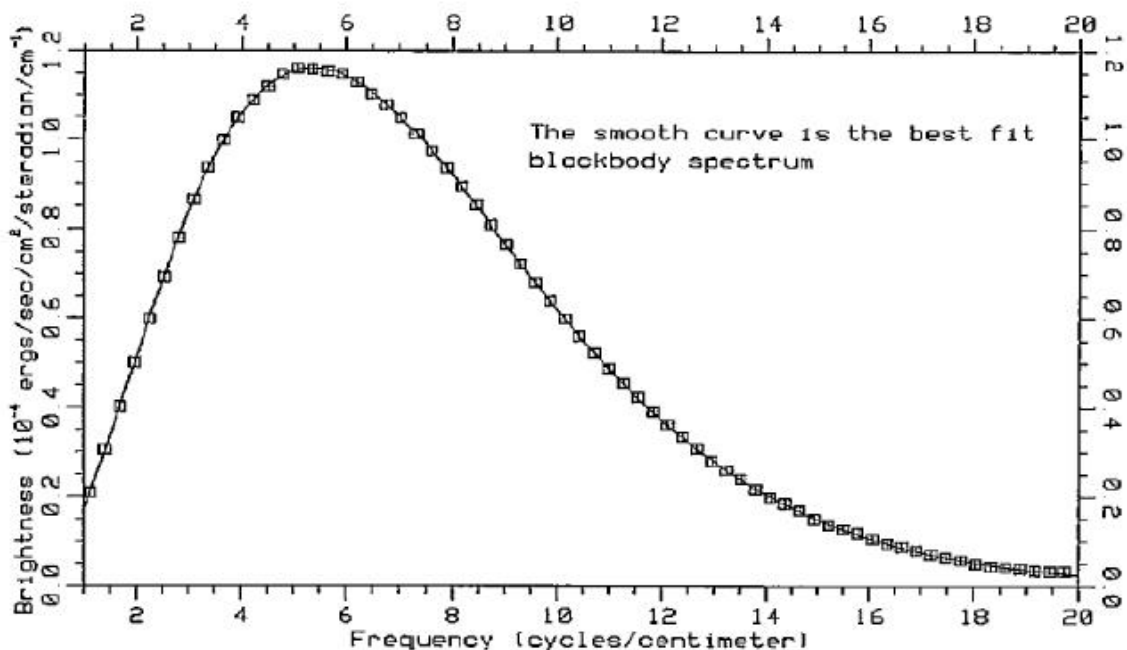
анизотропия (долу). Относителните чувствителности отгоре надолу са съответно 1, 100 и 100 000. Фонът от Млечния път, който не съответства на спектъра на абсолютно черно тяло (видим като червена ивица в най-добната част), не е изваден.

Повечето модели за формиране на структура предсказват, че вариациите на температурата трябва да имат гаусово разпределение за големи ъгли (което съответства на измерванията с DMR). В инфлационните модели гаусовото разпределение се дължи на първичните квантови флуктуации. Данните от DMR на COBE показват гаусово, приблизително мащабно инвариантни температурни флуктуации и в този смисъл подкрепят инфлационните модели (Kogut et al. 1996).

Спектърът на абсолютно черното тяло

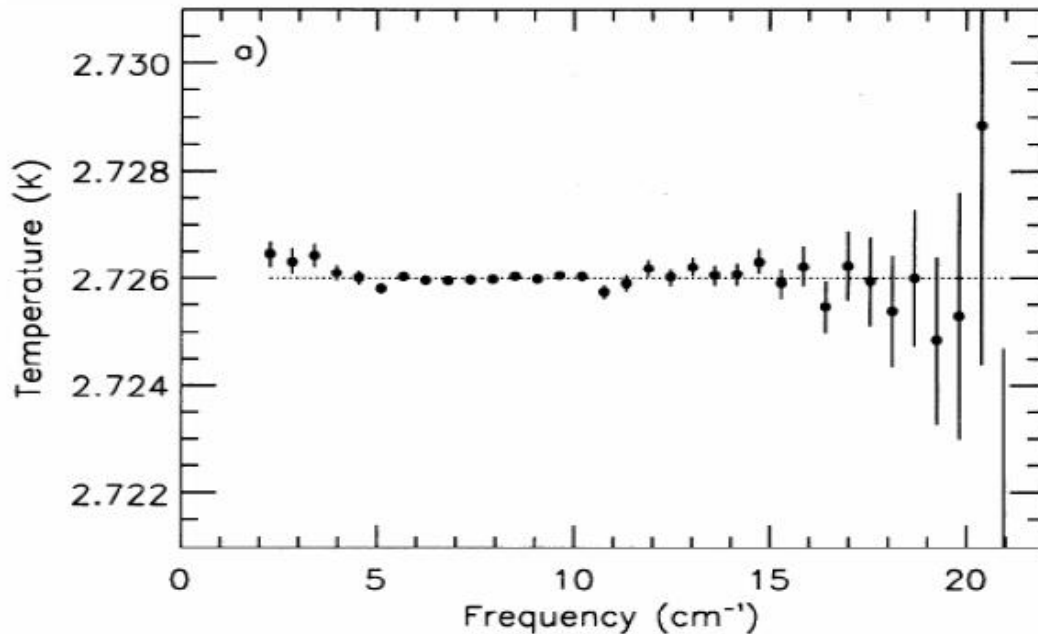
Инструментът FIRAS (Mather et al. 1982) измерва спектъра на КМЛ във вълновия обхват от 0,1 – 10 mm и показва, че той отговаря с голяма точност на спектъра на абсолютно черно тяло. Фиг. 6 показва първите резултати от FIRAS в интервала дължини на вълните 0,5 – 5 mm (Mather et al. 1990), получени само след 9 минути. Данните съответстват идеално спектъра на абсолютно черно тяло с температура 2.735 ± 0.060 K. За онова време това беше изненадващо откритие, тъй като по-раншните измервания (напр. Matsumoto et al. 1988 at 0.5 and 0.8 mm) бяха показали доста значителни отклонения от формата на спектъра на абсолютно черно тяло, хвърляйки по този начин съмнение върху модела на Големия взрив.

Фиг. 7 показва отклоненията от спектъра на абсолютно черно тяло с температура $2,726 \pm 0.010$ K, публикувана през 1994 (Mather et al. 1994). След внимателно изучаване на грешките, причинени от калибратора на FIRAS (фиг. 4), температурата бе фиксирана окончателно на $2,725 \pm 0.002$ K (Mather et al. 1999), при което отклоненията от спектъра на абсолютно черно тяло с такава температура са по-малки от 1 на 10^5 .



Фиг. 6: Първите резултати от FIRAS (Mather et al. 1990). Данните са събрани за девет минути в посока на северния галактичен полюс. Малките

квадратчета показват измерванията с постоянна грешка, оценявана на 1 %. Единицата по вертикалната ос е $\text{erg (cm s sr)}^{-1}$. Връзката с единиците в СИ е $1 \text{ MJy sr}^{-1} = 2.9979 \cdot 10^{-7} \text{ erg (cm s sr)}^{-1}$. Плътната линия съответства на формата на спектъра на абсолютно черно тяло.



Фиг. 7: Публикуваните през 1994 г. резултати от FIRAS (Mather et al. 1994). Експерименталните точки показват отклоненията от спектъра на абсолютно черно тяло с температура 2.727 K (окончателният резултат за температурата е $2,725 \pm 0,002 \text{ K}$, Mather et al. 1999). Най големите отклонения бяха 0,03 % от максималното лъчение (от Mather et al.1994).

В ранната Вселена веществото и лъчението са били в топлинно равновесие и съответствието с формата на спектъра на абсолютно черно тяло не се влияе от разширяването, стига да не се освобождава енергия (напр. раждане на фотони при разпади на частици или от малки черни дупки). Наблюдаваното много точно съответствие със спектъра на абсолютно черно тяло поставя много силни ограничения за подобно освобождаване на енергия (Wright et al. 1994). Стойността на температурата на абсолютно черното тяло е един от най-точно определените космологични параметри.

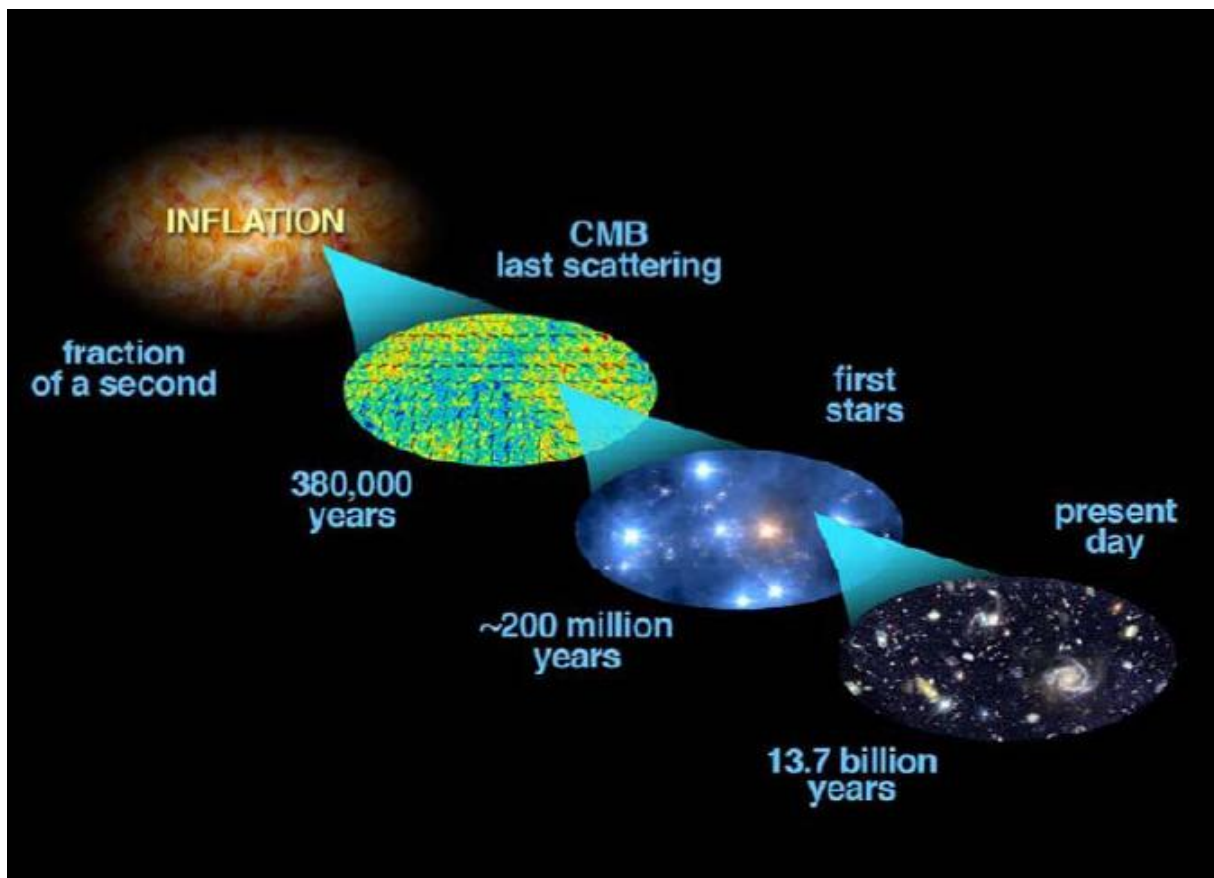
Перспектива

Откриването през 1964 г. на космическия микровълнов фон имаше голямо влияние върху космологията. Резултатите на COBE от 1992 г., давайки силна поддръжка на модела за Големия взрив, осигуриха една много по-детайлна картина и космологията се превърна в точна наука. Започнаха нови амбициозни експерименти и скоростта на публикуваните статии нарасна с цял порядък.

Нашето разбиране за еволюцията на Вселената почива на известен брой наблюдения, включително (преди COBE) на факта, че нощното небе е тъмно, на доминирането на количествата на водорода и хелия над тези на тежките елементи, на откритото от Хъбл разширяване и на съществуването на КМЛ. Наблюденията върху

формата на спектъра на КМЛ, извършени на COBE, и свързаните с тях температурни флуктуации дадоха извънредно силна подкрепа на модела на Големия взрив, доказвайки космологичния произход на КМЛ и откривайки първичните зародиши на наблюдаваните днес големи структури.

Докато обаче основната представа за разширяващата се Вселена е добре установена, остават някои основни въпроси, засягащи по-специално най-ранните времена, за които се предлага едно почти експоненциално разширение – *инфлация*. Инфлацията дава елегантни отговори на много въпроси в космологията. Съществуват обаче и други, конкуриращи теории. Инфлацията може би е генерирала гравитационни вълни, които в някои случаи биха могли да бъдат детектирани непряко чрез измерване на поляризацията на КМЛ. Фиг. 8 показва различните етапи в еволюцията на Вселената според стандартния космологичен модел. Първите етапи след Големия взрив са все още на равнището на предположения.



Фиг. 8: Етапи в еволюцията на Вселената. От Task Force On Cosmic Microwave Background Research, National Academies 2005.

Многобройните наблюдения на КМЛ, включително и със спътника WMAP с много по-добра ъглова разделителна способност от COBE осигуриха изобилие от космологична информация. Чрез комбиниране с резултатите от други опити може да се оцени количеството тъмна материя във Вселената. Тук има силна връзка с физиката на елементарните частици и в частност с ускорителя LHC (Large Hadron Collider) в ЦЕРН, който може скоро да докаже съществуването на нови частици като суперсиметричните частици, на които се дължи тъмната материя и които сародени в много ранната Вселена.

Литература

<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>

Mather, J.C. and Boslough, J. 1996: *the very first light* (BasicBooks 1996)

Smoot, G. and Davidson, K. 1993: *Wrinkles In Time* (Little, Brown and Company, London 1993)

Alpher R.A. & Herman R.C. 1949 Phys. Rev. 75, 1089

Alpher R.A., Herman R.C. & Gamow G. 1967 Proc. Nat. Sci. USA 58, 2179

Bennett, C.L. et al. 1996, Astrophys. J.(Letters) 464, 1 (4-year cobe DMR results)

Bennet, C.L. et al. 2003, Astrophys. J. Suppl. 148, 1

Bogges, N.W. et al. 1992, Astrophys. J. 397, 420

Conklin, E.K. 1969, Nature 222, 971

Corey, B.E. and Wilkinson, D.T. 1976, BAAS 8, 351

Dicke, R.H. 1946, Rev. Sci. Instr. 17, 268

Dicke, R.H. et al. 1965, Astrophys. J. (Letters) 142, 414

Doroshkevich, A.G. and Novikov, I.D. 1964, Sov. Phys. Doklady 9, 111.

Fixsen, D.J. et al. 1996, Astrophys. J.473, 576, [astro-ph/9605054]

Friedmann, A. 1922, Z. Phys. 10, 377

Gamow G. 1946, Phys. Rev. 70, 572

Henry, P.S. 1971, Nature 231, 561

Herman, R. 1997 The Prediction of the Cosmic Microwave Background Radiation in Proc. of the George Gamow Symposium, George Washington University 12 April 1996 (Ed. E. Harper et al., Astronomical Society of the Pacific Conference Series no. 129) p. 71

Kogut, A. 1996, Astrophys. J (Letters) 464, 29

Lemaître, G. 1927, Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, Tome XLVII, série A, 49

Mather, J.C. 1982, Opt. Eng. 21, 769

Mather, J.C. et al. 1990, Astrophys. J. (Letter) 354, 37

Mather, J.C. 1994, Astrophys. J. 420, 440

Mather, J.C. et al. 1999, Astrophys. J 512, 511

Matsumoto T. et al. 1988, Astrophys. J. 329, 567

McKellar, A.1941, Publ. Dominion Astrophys. Obs. 7, 251

Penzias, A.A. 1979 The Origin of Elements, Les Prix Nobel, 444

Penzias, A.A. and Wilson, R.W. 1965, Astrophys. J (Letters) 142, 419

Sachs, R.K. and Wolfe, A.M. 1967, Astrophys. J. 147, 73

Smoot, G.F., Gorenstein, M.V. and Muller, R.A. 1977, Phys. Rev. Lett. 39, 898

Smoot, G. et al. 1990 Astrophys. J 380, 685

Smoot, G. et al. 1992 Astrophys. J (Letters) 396, 1

Tolman, R.C. 1931, Phys. Rev. 37, 1639

Weinberg, S. 1993: The First Three Minutes, 2nd edition (BasicBooks 1988&1993)

Weiss, R. 1980 Ann. Rev. Astron. Astrophys. 18, 490

Wilkinson, D.T. and Peebles, P.J.E. 1983, in Serendipitous Discoveries in Radio Astronomy (National Radio Astronomy Observatory, Green Bank WV 1983) s. 175.

Wilkinson, D.T. and Peebles, P.J.E. 2000, Proceedings of Nobel Symposium 109, Enköping 1998, (Eds. L. Bergström, P. Carlson and C. Fransson) Physica Scripta T85,136

Wilson, R.W. 1979 The Cosmic Microwave Background Radiation, Les Prix Nobel, 463

Wright, E.L. et al. 1992, Astrophys. J. (Letters) 396, 13

Wright, E.L. et al. 1994, Astrophys. J. 420, 450

Прев. X. Д.