

Скраћенице

LBL (као и LBNL)– Lawrence Berkeley National Laboratory

ANU – Australian National University

GCP – Gruber Cosmology Prize, додељује Cambridge University

STScI – Space Telescope Science Institute (joint venture NASA & Johns Hopkins)

SNAP – Super Nova Acceleration Probe

Λ CDM – Cold Dark Matter уз присуство тамне енергије

FRW - Friedmann-Robertson-Walker (метрика и/или космологија, зависно од контекста)

SNLS – Supernova Legacy Survey

LSS – Large Scale Survey

DES – Dark Energy Survey

CCD – Charge-Coupled Device

SDSS – Sloan Digital Sky Survey

QFT – Quantum Field Theory (квантна теорија поља)

GR – General Relativity (општа теорија релативности)

SZE – Суњајев-Зелдович Ефекат

SDSS – Sloan Digital Sky Survey

Тамна енергија

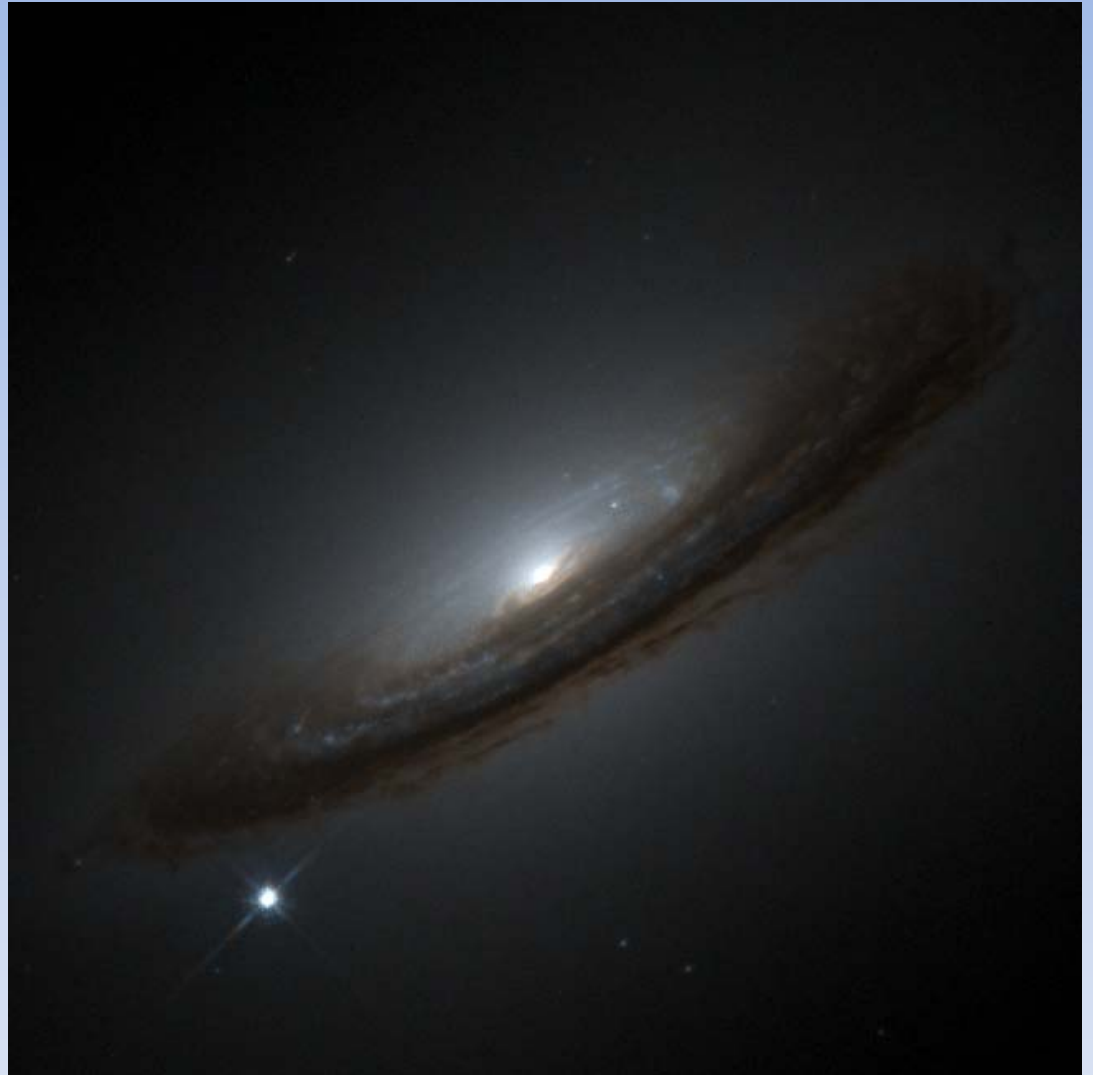
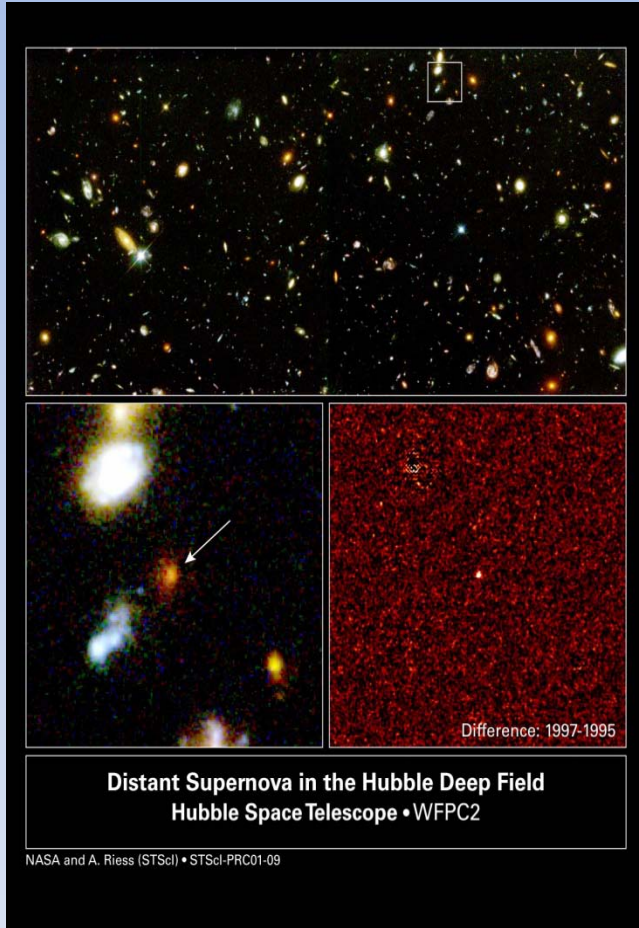
десет година после

Преглед актуелних астрофизичких
резултата уз мало космолошких
спекулација

- Почетак је (нажалост?!) неодвојив од космологије
- У трагању за Хабловом константом постојало је неколико методологија (Sandage, Freedman, Merck, ..)
- Када се константа “сместила” између 60 и 90 km/s/Mpc, појавила се потреба за прецизнијим мерењем
- Најбољи (заправо једини) кандидат су супернове
- У “менаџерији” се истиче посебно једна класа SNe Ia која настаје у двојним системима где експлодира парњак који је бели патуљак.
- Бели патуљак “прождире” другог парњака и када достигне Chandrasekar-ову границу ($1,4 M_{\odot}$) експлодира
- Фотометријски подаци, као и друга упоредна мерења, показују да све звезде ове класе “болују од звездане амнезије” и да, независно од структуре акреционог материјала, експлодирају на Chandrasekar-овој граници што значи да имају исти апсолутни сјај приликом експлозије
- Значи, намећу се као идеални кандидати за мерење растојања.
- Ваља констатовати да је овде уметнута “осредње јака” космолошка претпоставка која гласи: Васиона је трансемпорално изотропна и хомогена (в крупних масштабах).

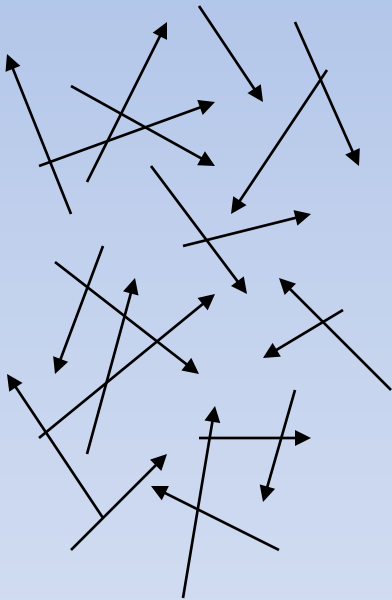
1994D $z \approx 0,003$ →

$z \approx 2$ ↓

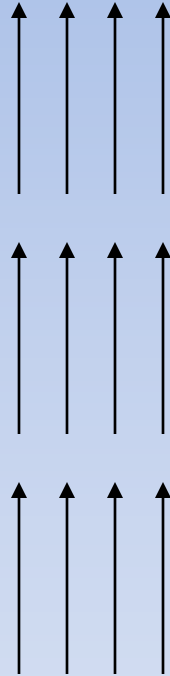


- 1994 су формирана два тима један је предводио Saul Perlmutter (LBL) а други Brian Schmidt (ANU). Кључни играч његовог тима је био Adam Riess (Johns Hopkins STScI)
- 1998. је почела хисторична размена email-ова између два тима. Изгледало је, наиме, да су Ia супернове мање сјајне (0,24 m него што би требало) сразмерно удаљавању.
- Дакле: Вациона убрзава своје ширење.
- Оба тима су у том тренутку располагала са “неколико туцета” квалитетно фотометријски обрађених звезда са црвеним помацима између 0,5 и 1.
- Консензусом је одлучено да нико није први и награде се ex equo додељују обома тимовима (потребан добар познавалац српске граматике) - 500.000\$ GCR, \$1 mil Shaw Prize
- Ваља констатовати да је овде уметнута “јача” (а у суштини слабија од претпоставке о изотропности и хомогености) космолошка претпоставка која гласи: Црвени помак је (глобално) космолошког порекла.
- Она је, међутим, “безопасна” јер је математички отклоњива неутралним еквивалентом.

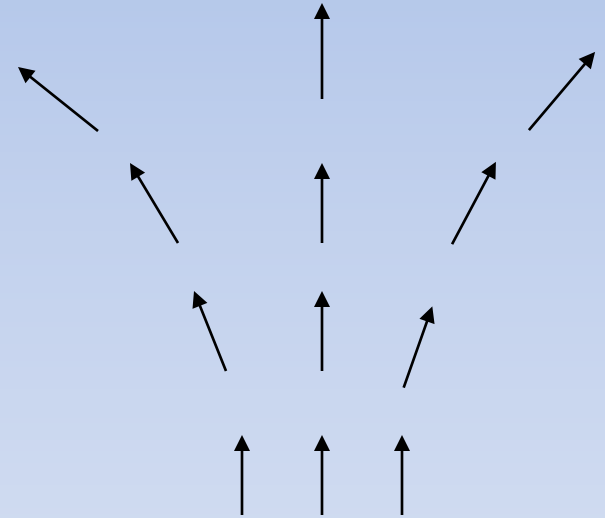
Коперниканско начело



изпотропна
хомогена

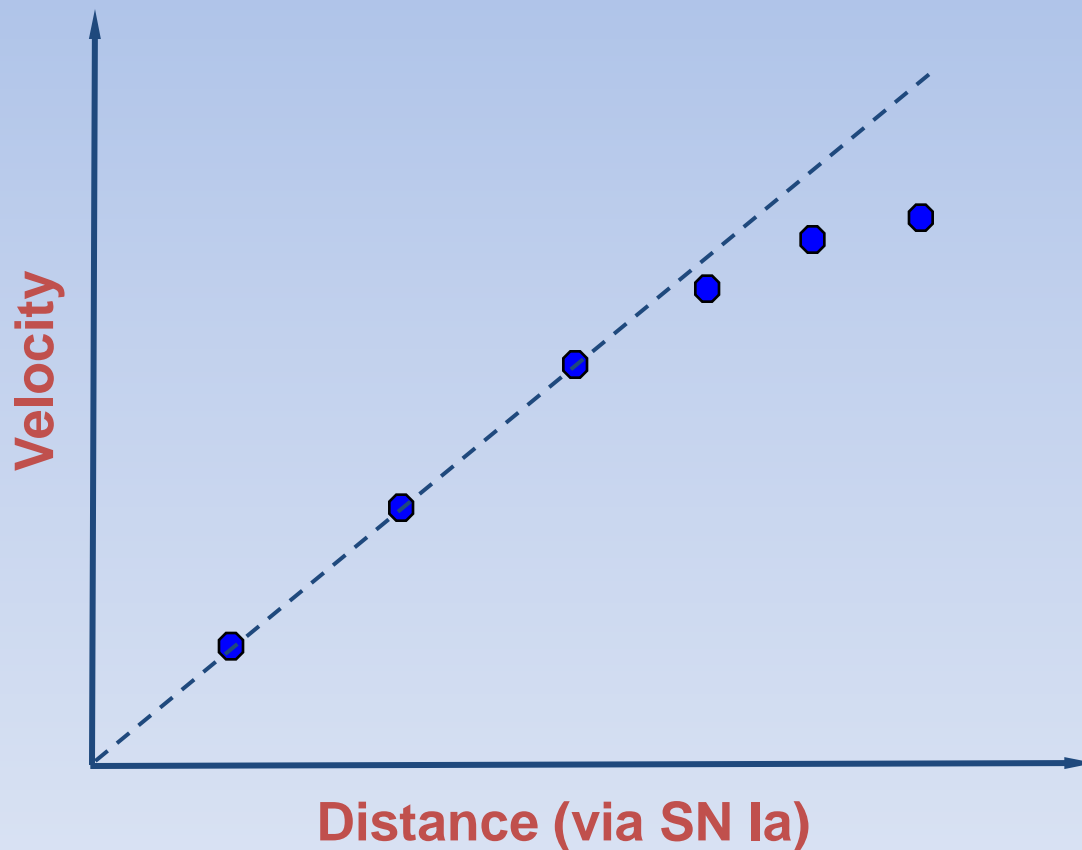


неизотропна
хомогена

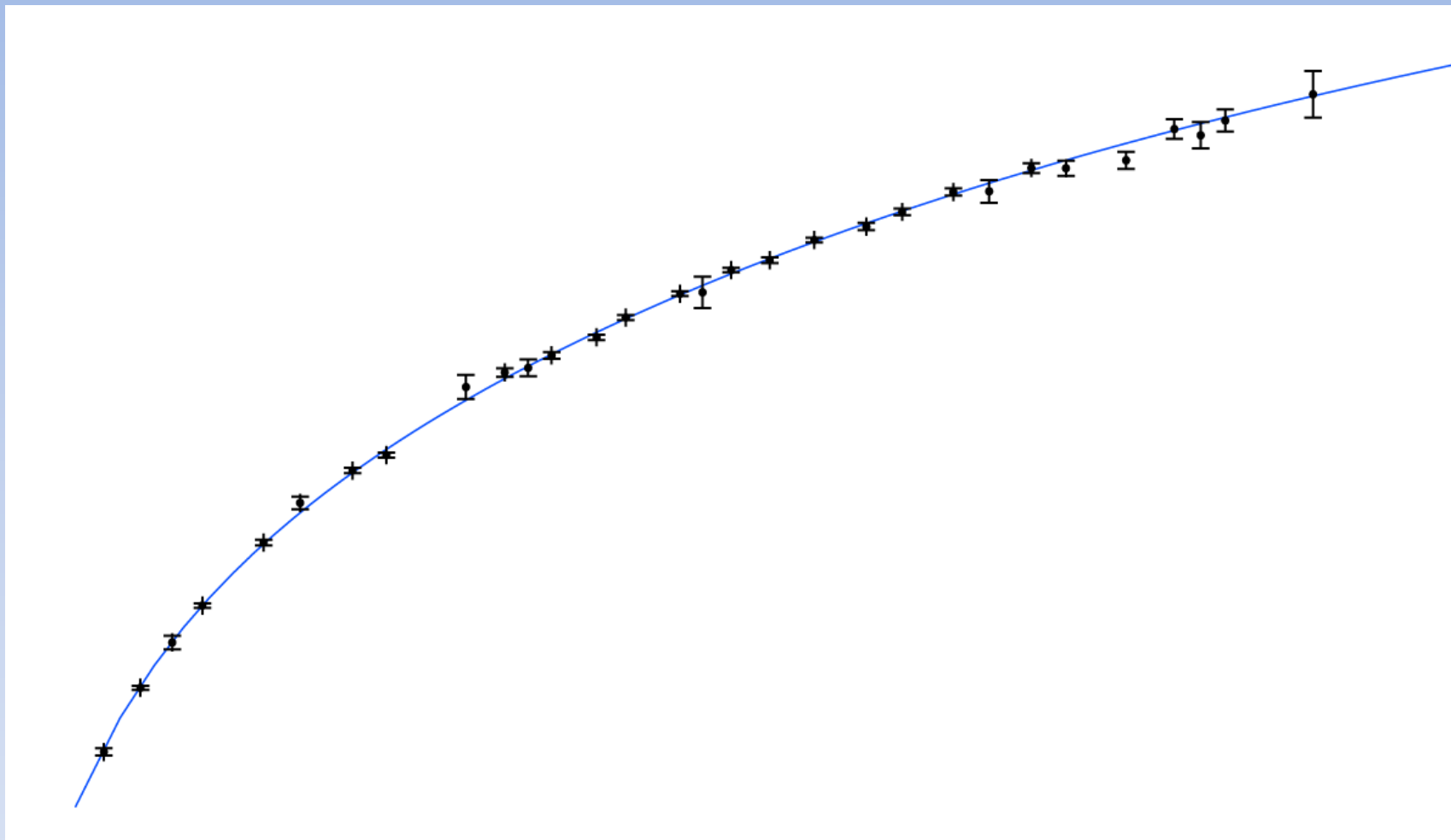


неизотропна
нехомогена

Пакости ради, овако је изгледао први график у препринту на arcXiv
Види се шест тачака (пола туцета дакле, мада су можда неке агломерати)
и не зна се колико је z на коме тачке “почињу да испадају “са праве
линије



E, ово је већ боље



Kowalski et al., ApJ 2008 [arXiv:0804.4142]

- До краја 2008 је обрађено 300 супернових класе Ia до $z=2$ са квалитетним фотометријским подацима.
- У обради је још 200 за које су подаци или стари или непотпуни али могу да се искористе (SNLS).
- Сви подаци фитују на криву Kowalski типа тако да је опадање сјаја са порастом црвеног помака сада астрофизичка чињеница и са систематском и са статистичком грешком мањом него за већину посматрања за $z \approx 0,5$.
- Дакле, “рачун супернових”, представља јаку потврду хипотезе да се васиона убрзава ширење после $z < 0,5$. Тако је космологија постала егзактна наука (“Нетачно, постала је 1992, после обраде првих COBE резултата”, Д. Урошевић, *Table talks*, Београд, 2009, необјављено)
- Да ли постоји још астрофизичких аргумената у прилог тези о убрзавању ширења васионе?
- У аргументацијској хијерархији 1. доказ 2. потврда 3. индиција (“у складу је са”) 4. није противречно (“не омета досадашње анализе засноване на 1. до 3”), из класе 1. нема ни једног, нити ће бити. Из класе 2. су само супернове, док из класа 3 и 4 има аргумената али:
- Мора се посегнути за јачим космолошким претпоставкама.

Елементарна космологија

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{(1-kr^2)} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right]$$

FRW (Friedmann-Robertson-Walker) метрика, То су класичне, Риманове, једначине кретања у кординатном систему везаном за тачку која се креће, k је закривљеност простора а $a(t)$ *космичка скала, фактор скалирања* (cosmic scale factor) ($a=1$, сада). Васиона се посматра као изотропан и хомоген скуп таквих тачака (флуид).

Везе са основним астрономским и астрофизичким категоријама:

Ако се фотон креће кроз васиону са $a(t)$ $\lambda_{obs} / \lambda_{em} = 1/a(t_{em}) \equiv 1+z$ чиме се уводи параметар z . Верујемо да је то управо црвени помак, односно да је промена таласне дужине искључиво резултат узајамног кретања извора и пријемника.

Временски интервали су тада повезани са z функционалном везом

$$dt = -dz \left(\frac{\dot{a}}{a} \right) (1+z)$$

Израз у загради се означава са H и назива Hubble-овим параметром. У савременој епохи $H_0 = 100 h \text{ km/sec/Mpc}$ где је $h \approx 0,7$. Када се једначине поља GR примене на FRW

добијају се Friedmann-ове космолошке једначине. ρ је укупна густина енергије

у васиони (материја, зрачење укључујући и релативистичке честице и сама тамна енергија) а p укупни притисак свих компонената.

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\Lambda = 8\pi G\rho_{VAC} = -8\pi Gp_{VAC}$$

Пауза са историјским освртом

Откуд оволика самоувереност оних који сада исписују модерне космолошке једначине? Зар Λ није мртво “одавно”? Како се то тако лако васкрсава? Можда опет премине без читуље?

Ипак, изгледа да неће. Бар, не напрасно.

Einstein-de Sitter 1917, први икада формулисан космолошки модел. Статичан и коначан, нужен због “мале брзине звезда”. Простор је позитивно закривљен $R_{curv} = 1/\sqrt{4\pi G\rho_M}$, а гравитациона “одбојност” је компензована великом густином тешке масе. De Sitter разматра пак и опције у којима је густина тешке масе безначајна.

Hubble-ово откриће 1929 све ово баца у воду. Einstein Λ назива својом “највећом грешком” (тврди Gamow). Међутим Eddington, de Sitter и Lemaître су значајне ствари дедуковали и из (можда) погрешног модела. Рецимо Eddington је показао да је старост васионе изведена из Hubble-овог тадашњег параметра ($H_0 \approx 570$ km/sec/Mpc) “непријатно мала” (2 Gsg).

Λ васкрсава поново 1948 са Bondi & Gold и Hoyle “steady state” моделом. Њега пак “убијају” квазари а “сахрањује” СМВ. Од тада до инфлације се Λ не помиње.

Инфлација “пегла” васиону, нејасност податка $\Omega_M = 0,1$ као и растојања од СМВ, или LS стварају додатну конфузију.

Зељдович, као “за инат”, указује 1968 на редове величине који стварају проблеме са енергијом вакуума. Са друге стране безначајност Λ (ако га и има) у периоду нуклеосинтезе и проналазак СМВ бацају Λ у засенак.

Инфлација и COBE, међутим “чине своје”.

Убедљивост инфлаторне парадигме и чврстина COBE мерења указују да се време Великог праска смешта између 13 и 15 Gsg што је, пак, незгодно близу старости најстаријег лоптастих звезданих облака.

Неопходан је, дакле, неки параметар за “фино подешавање”.

Нада да је $\Omega_M = 1$ ипак не јењава.

Проналазак тамне материје је чак бодри, јер је сада $\Omega_M \approx 0,3$.

Анизотропије у CMB ипак забадају нож у срце $\Omega_M = 1$.

Постојало је још неколико опција (релативистичка тамна материја, MACHO) али су све убрзо пале у воду.

На неки начин, деведесете године протеклог столећа су биле “године без космологије”.

Стога је откриће дефеката у дистрибуцији супенових које се могло протумачити (и) тамном енергијом изазвало толико одушевљење.

По аналогији са првим законом термодинамике $dE = -pdV$

уводи се космолошки еквивалент закона одржања енергије $d(a^3 \rho_i) = -p_i d(a^3)$

$w_i \equiv \rho_i / p_i$ се назива једначином стања за сваку од компонената $i \in \{M, R, VAC\}$

Одавде (интеграцијом по времену или по z јер су повезани Hubble-овим параметром)

$$\rho_i \propto \exp \left[3 \int_0^z (1 + w_i(z')) d \ln(1 + z') \right]$$

Када је $w_i \equiv const$ онда је $\rho_i \propto (1 + z)^{3(1+w_i)}$ па је:

$\rho_M \propto (1 + z)^3$ јер је $w_M = 0$ (добра апроксимација),

$\rho_R = (1 + z)^4$ јер је $w_R = -1/3$ (последича QFT),

$\rho_{VAC} = -p_{VAC} = \Lambda / 8\pi G = const$ $w = w_{VAC} = -1$

Међу космолозима постоји јако убеђење да је $w = -1$ што карактерише *консезусни модел*. Постоји и јако убеђење да је васиона равна ($k=0$), али се – колико је могуће – избегава укључивање те претпоставке у прорачуне. “Све зависи од тог k ”, Б. Арбутина, Београд 2009, *Table talks*, необјављено)

Још један важан параметар је актуелна густина васионе (ако је равна, тј. $k=0$):

$\rho_{crit} \equiv 3H_0^2 / 8\pi G = 1,88 \times 10^{-29} h^2 gm/cm^3 = 8,1 \times 10^{-47} h^2 GeV^4$, која служи као

нормализациони параметар.

Тако је $\Omega_i = \rho_i(t_0) / \rho_{crit}$, $\Omega_0 = \rho(t_0) / \rho_{crit}$,

Равну васиону карактерише $\Omega_0 = 1$, а за васионе негативне односно позитивне кривине Ω_0 је мање односно веће од 1.

Bona fide модел васионе карактерише да је $\Omega_0 = 1$. Одакле следи и да је равна.

Никакве претпоставке на w се не постављају као што се у консезусном моделу ништа не претпоставља за Ω_0

Идеолошки и естетски идеал (већине) космолога је да “докажу” да се консензусни и *bona fide* модел подударају.

Иначе, ако $k \neq 0$, полупречник кривине је $R_{curv} \equiv a / \sqrt{|k|}$ и повезан је са Hubble-овом константом и Ω_0 везом $R_{curv} = H_0^{-1} \sqrt{|\Omega_0 - 1|}$. $H_0^{-1} \approx 3000 h^2 \text{MPC}$ се назива Hubble-ов полупречник. Ово “за сваки случај”, ако се испостави да васиона није равна.

“Равна” космологија је математички једноставна јер допушта решавања диференцијалних једначина у квадратурама, тј. можемо добити њихов аналитички облик.

Тако је, за равну васиону са материјом и тамном енергијом (као што је данас)

$$a(t) = (\Omega_M / \Omega_{VAC})^{1/3} \left(\sinh \left[3 \sqrt{\Omega_{VAC}} H_0 t / 2 \right] \right)^{2/3}$$

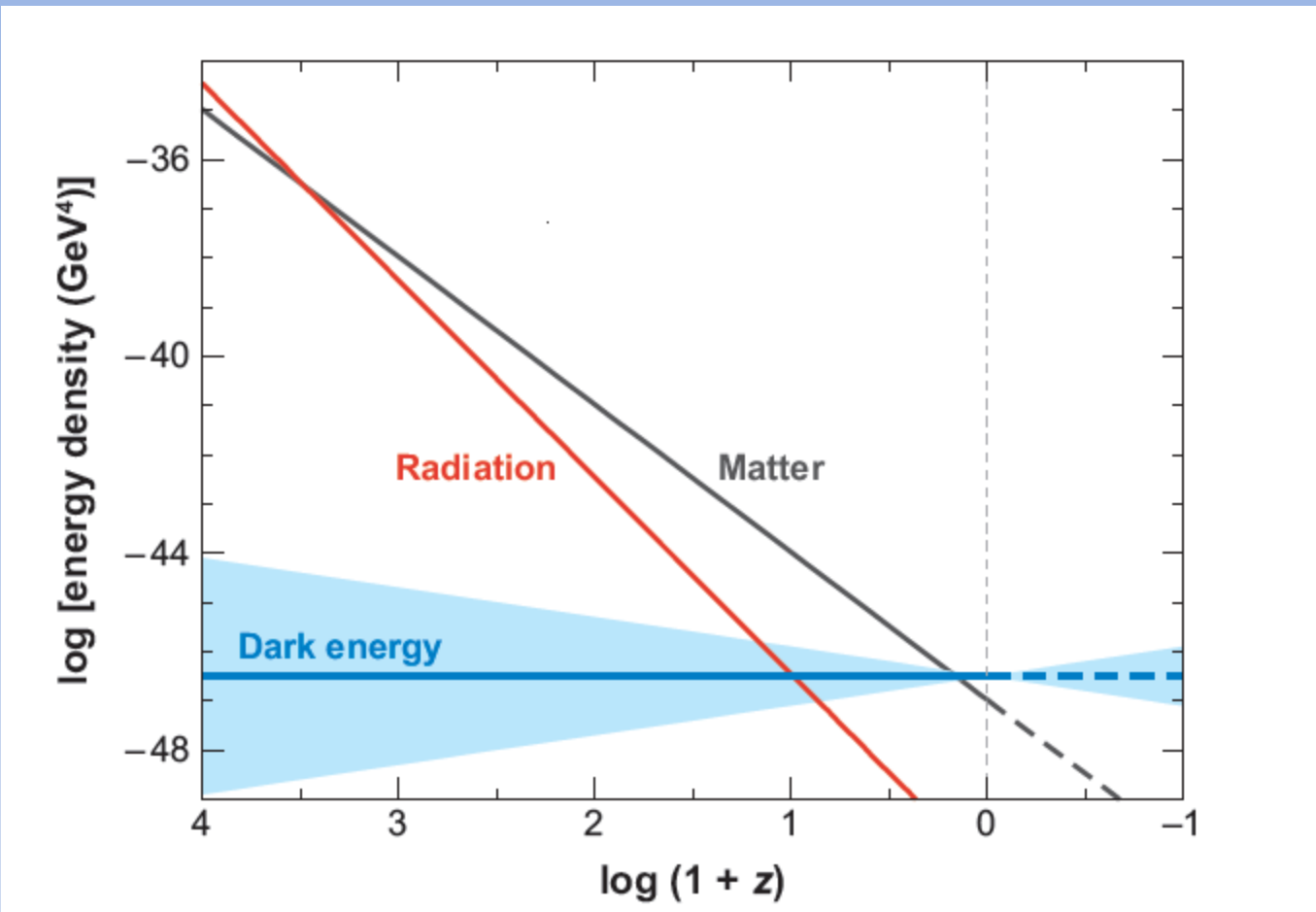
Одавде,

за савремену епоху ($z < 0,5$, $w = -1$) када доминира тамна материја $a(t) \propto \sinh(Ht)$

А за епоху када је доминирала материја ($0,5 < z < 3000$) $a(t) \propto t^{2/3}$

Коначно, за епоху када је доминирала радијација ($3000 < z$), $a(t) \propto t^{1/2}$

Еволуција васионе се описује дијаграмом преузетим из *Frieman et al.* који се савршено уклапа у непосредна осматрања и посредне прорачуне.



Плави регион обухвата $w = -1 \pm 0,2$ и показује да w није критично. Тамна енергија, дакле, мора да преовлада у савременој епохи.

Што се брзине промена тиче, *параметар успорења* се дефинише:

$$q(z) \equiv -\frac{\ddot{a}}{aH^2} = \frac{1}{2} \sum_{i \in \{R, M, VAC\}} \Omega_i(z) [1 + 3w_i(z)] \quad \text{где је} \quad \Omega_i(z) \equiv q_i(z) / q_{crit}(z)$$

и различито се понашао у различитим епохама.

Када су доминирали радијација и материја, $q > 0$, па је $\ddot{a} < 0$ односно гравитација је успоравала ширење васионе.

Обратно, али не баш сасвим, када је сабирак ($\rho + 3p$) позитиван ($p < -\rho/3$) онда је гравитациона компонента одбојна и може да изазове убрзање да расте ($\ddot{a} > 0$). То је и дефинишуће својство тамне енергије. Ово, са успешним предвиђањима Friedmann-ове космологије у погледу нуклеосинтезе после Великог праска и стварања анизотропија у МПЗ (СМВ) су главна подршка релативистичкој елементарној космологији.

Додатно, у тим фазама је \ddot{a} било двоструко веће од убрзања које предвиђа Њутновска елементарна космологија. Посматрачки подаци указују управо на то.

Ово је и врхунски домет елементарне космологије.

Свака даљи напредак (или компликовање) зависи од увођења физичких претпоставки у модел.

Стога нам је потребна бар у елементарном облику:

Физичка космологија

Елементарна космологија даје прилично добру, али грубу слику о еволуцији васионе.

Реално, то је само FRW метрика+GR+неке претпоставке о параметрима флуида

Да би се знало више мора се ући у структуру “твари” од које је начињена васиона.

Или, ако већ не познајемо ту структуру, можемо бар мерити њено понашање.

За сваки објекат са сопственим сјајем L , и са мереним флуксом F дефинише се d_L ,
дакле растојање одређено сјајем (обичан реципрочни квадратни закон):

$$d_L \equiv \sqrt{\frac{L}{4\pi F}} = (1+z)r(z) \quad \text{односно} \quad r(z) = \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} = \int_{1/(1+z)}^1 \frac{da}{a^2 H(a)}$$

$$r(z) = |k|^{-1/2} \chi \left[|k|^{1/2} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right] \quad \text{где је } \chi(x) = \sin(x) \text{ } k > 0, \text{ односно } \sinh(x) \text{ за } k < 0.$$

Конкретно, за равну васиону и константно w

$$r(z) = \frac{1}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M (1+z')^3 + (1-\Omega_M)(1+z')^{3(1+w)} + \Omega_R (1+z')^4}}$$

У савременој епохи је $\Omega_R = 0,8 \times 10^{-4}$ па је допринос фотона и релативистичких
неутрина безначајан.

Историјски $\mu(z) = m - M = 5 \log(d_L / 10 \text{ pc}) = 5 \log[(1+z)r(z) / \text{pc}] - 5$

Ако космичку скалу $a(t)$ развијемо у Тејлоров ред око t_0 (данашња епоха)

$$a(t) = 1 + H_0(t - t_0) - q_0 H_0^2 (t - t_0)^2 / 2 + \dots$$

опет добијамо историјску везу растојање – црвени помак у облику

$$H_0 d_0 = z + \frac{1}{2}(1 - q_0)z^2 + \dots \quad \text{која конвергира, наравно, само за } z < 1, \text{ али је лепа.}$$

То је чувени *Hubble*-ов дијаграм.

Данас се за тестове убрзања-успорјења користи и $z \approx 2$ па је неопходна пуна формула.

Слично важи и за угаону величину објекта са, рецимо, фиксним дијаметром D .

$$d_A \equiv D / \delta\theta = r(z) / (1 + z) = d_L (1 + z)^2$$

Слично је за ко-покретни елемент запремине, угаони сегмент

$$\frac{d^2V}{dzd\Omega} = r^2 \frac{dr}{dz} \frac{1}{\sqrt{1 - kr^2}} = \frac{r^2(z)}{H(z)}$$

До сада је коришћен минимум физике. Сада, мало више.

Време од Великог праска до данас је

$$t(z) = \int_0^{t(z)} dt' = \int_0^\infty \frac{dz'}{(1 + z')H(z')}$$

Наоко, делује неупотребљиво због неконтролисаног раста $H(z)$ и зависности од темпа експанзије у веома раним епохама. Али, захваљујући МПЗ и добрим проценама $z_{LS} \approx 1100$ ($t_{LS} \approx 380.000$ година) чак је и ова формула употребљива осим у екстремним инфлацијским сценаријима.

Раст структуре

Главни успех консензус модела је предвиђање садашње структуре васионе, уз претпоставке:

1. Тамна материја се углав. састоји од нерелативистичких честица (CDM парадигма)
2. Почетни спектар (дистрибуција енергија по таласном броју) је био инваријантан у односу на размере. $P(k) \sim k^{n_s}$ и $n_s \sim 1$. Тако предвиђа инфлаторна парадигма, али је и ова њена последица довољна.

GR предвиђа раст нискоамплитудних промена густине материје (у размерама битно мањим од *Hubble*-овог полупречника) по једначини:

$$\ddot{\delta}_k + 2H \dot{\delta}_k - 4\pi G \rho_M \delta_k = 0$$

Где су пертурбације развијене у Фуријеове редове и претпоставља се да материја не врши никакав притисак.

Тада су решења једначине једноставна и казују следеће:

$\delta_k(t)$ расте као као $a(t)$ у периодима када доминира материја и приближно је константно у периодима када доминирају радијација односно тамна енергија.

$2H \dot{\delta}_k$ је Hubble-ов “дампинг” параметар.

Када почне убрзавање експанзије васионе, раст линеарних пертурбација (статистички) престаје јер демпфовање има краћи период од времена потребног да пертурбације порасту.

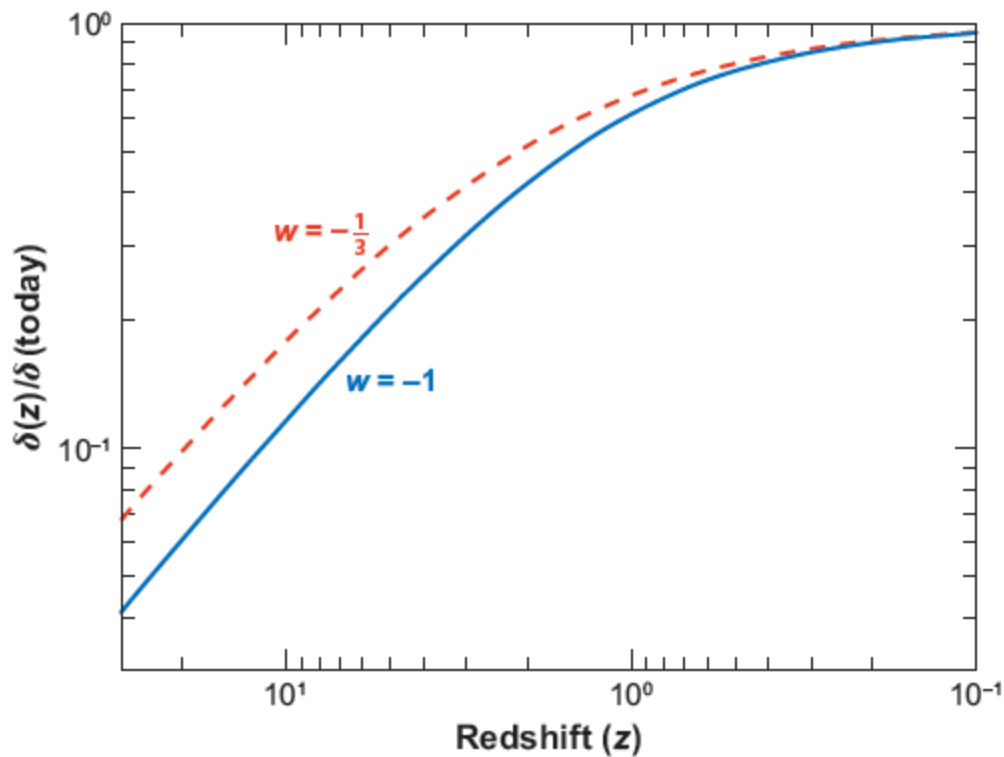


График (*Frieman et al.*) показује да посматрање формирања структура и епоха у којима су формиране, односно завршиле формирање, носи могућности да се кроз посматрања прецизније одреди w .

Међутим, мале разлике у црвеном помаку (времену) престанка пертурбација (за значајне разлике у w) показују да се за иоле релевантну употребу овог метода мора располагати или са “ултра” прецизним растојањима за “блиске” објекте, као и са веома прецизним за нешто удаљеније. Такође то тражи претрагу великих сегмената неба како би се прецизно одредила LSS што значи тачна геометрија јата (CL). То припада новој генерацији инструмената.

Шта је још астрофизички смислено, а посматрачки оствариво у следећим деценијама ?

Мимо самих супернових и LSS, разумљиво, у оптицају су десетине идеја и предлога. Озбиљно, пак, истичу се две.

1. ВАО барионске акустичке осцилације. Пре раздвајања бариона и фотона, у примордијалној плазми је брзина звука била. .. После раздвајања (ска 380.000 г. од великог праска) те осцилације су морале да се одразе на LSS. Зависно од вредности космолошких параметара у епохи последњегх расејања, те осцилације су се на LSS одразиле у размерама реда величине 100 Мрс . Прецизно мапирање ових структура – требало би да изгледају као статистички поновљена јата и супер јата галаксија – у интервалу од 100 Мрс до 1 Грс, ће дати суштинско ограничење за већину космолошких параметара. Ово је у моћи 4m и већих земаљских инструмената, али је квалитет укупне фотометрије споран до слабе употребљивости.

2. Слаба гравитациона сочива (*Weak lensing*)

као и ВАО, метод треба да нам да бољи увид у LSS. За разлику од ВАО одражава се на скале реда величине 10 Мрс, али су посматрања још осетљивија на систематске грешке и могућности инструмената. “Слаба” означава да нас у овом прегледу неба највише занимају гравитациона сочива која не деформишу претерано долазак фотона из галаксија око 0,5 z. Такође гас на високим температурама расејава фотоне који потичу од СМВ и изазива мерљив ефекат одступања од спектра црног тела (Суњајев-Зељдович ефекат, SZE)

Један од важних проблема је стање садашње технологије CCD чипова

Посматрања у протеклој деценији и из њих изведени закључци

Анизотропије у МПЗ су важан индикатор убрзаног ширења. Да се оне развију у LSS потребно је да постоји компонента са негативним притиском чија густина спорије еволуира од густине материје.

Новија мерења WMAP (2007) указују (места и амплитуде акустичких пикова у гравитационим таласима примордијалног флуида) да је васиона равна до на неколико процената и да материја чини не више од једне четвртине критичне густине. Присуство компоненте тамне енергије је сасвим у складу са овим.

BAO остављају суптилније трагове.

Појављују се (у МПЗ анизотропијама) и на већим и на мањим угаоним резолуцијама У складу са присуством тамне енергије би биле агломерације које кореспондирају скалама од $100 h^{-1}$ и $8 h^{-1} Mpc$ и црвеном помаку од 0,35. Десетине радова из последњих неколико година то потврђују.

Legacy подаци (SDSS) као и поновни преглед радио каталога иду у прилог овим тврдњама. Chandra X-Ray Observatory подаци такође не противрече.

WL (потенцијално најбоље оружје за тестирање присуства тамне енергије) већ сада даје резултате у мапирању тамне материје. Деформисана слика галаксије под утицајем гравитационог LSS окружења, носи важну информацију о дистрибуцији тамне материје. Прегледи неба на 100 deg^2 дају $\sigma_8(\Omega_M/0,25)^{0,6} \approx 0,85 \pm 0,07$, што одговара претпоставци да је $\Omega_M \approx 0,25$.

Frieman et al ове резултате резимирају прегледним графиком:

ACBAR

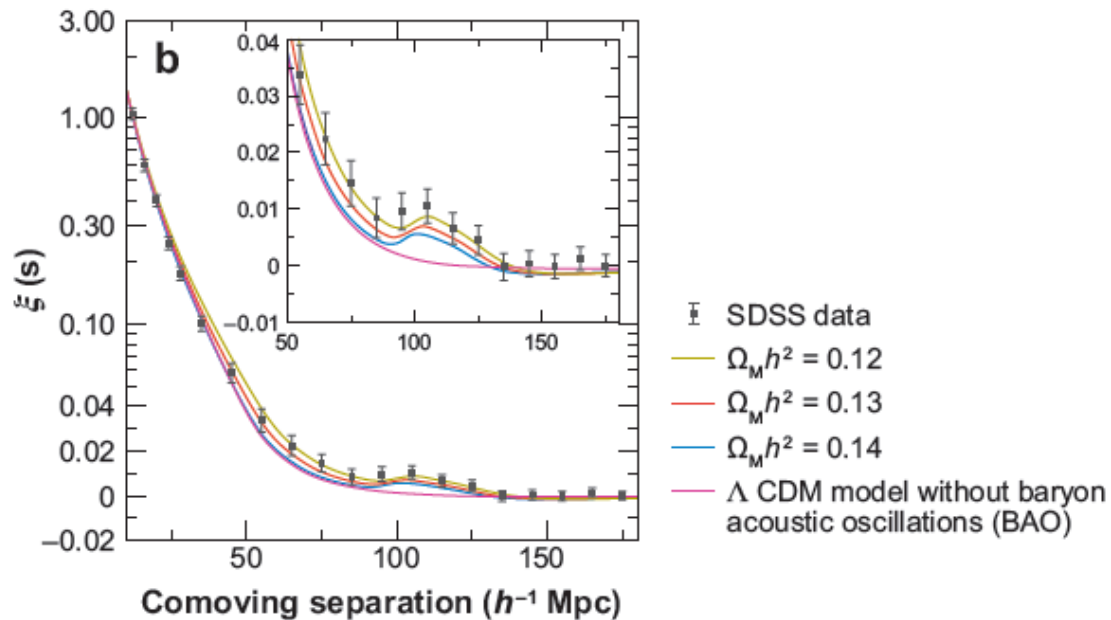
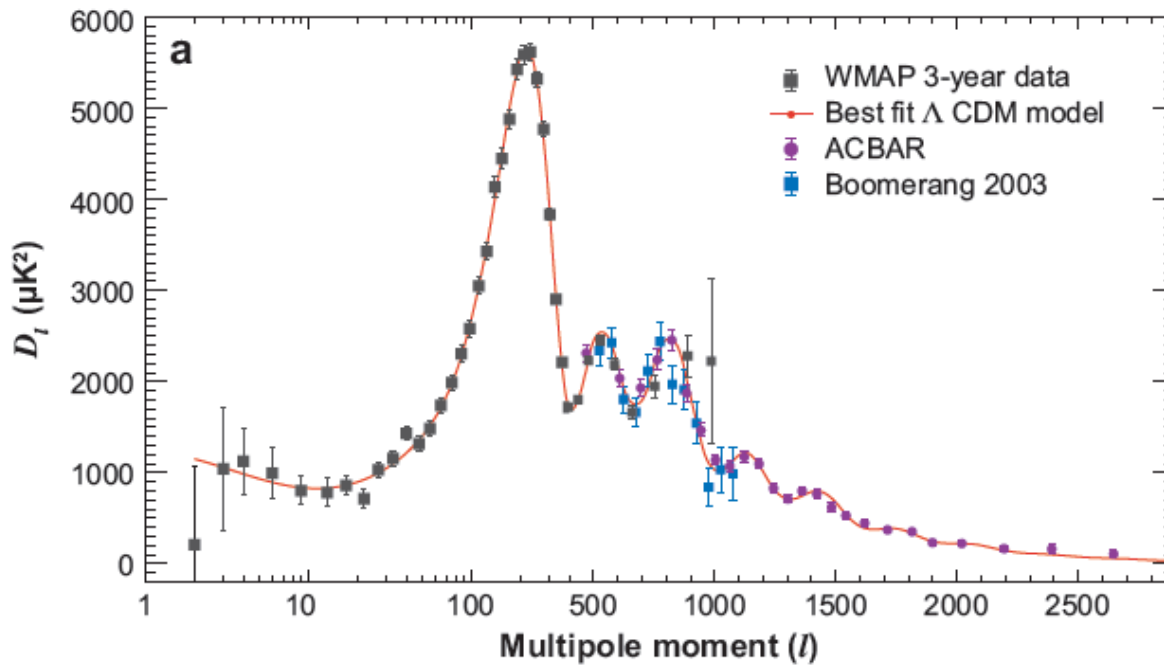
Arcminute Cosmology
Bolometer Array
Receiver

WMAP

Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe

SDSS

Sloan Digital Sky
Survey



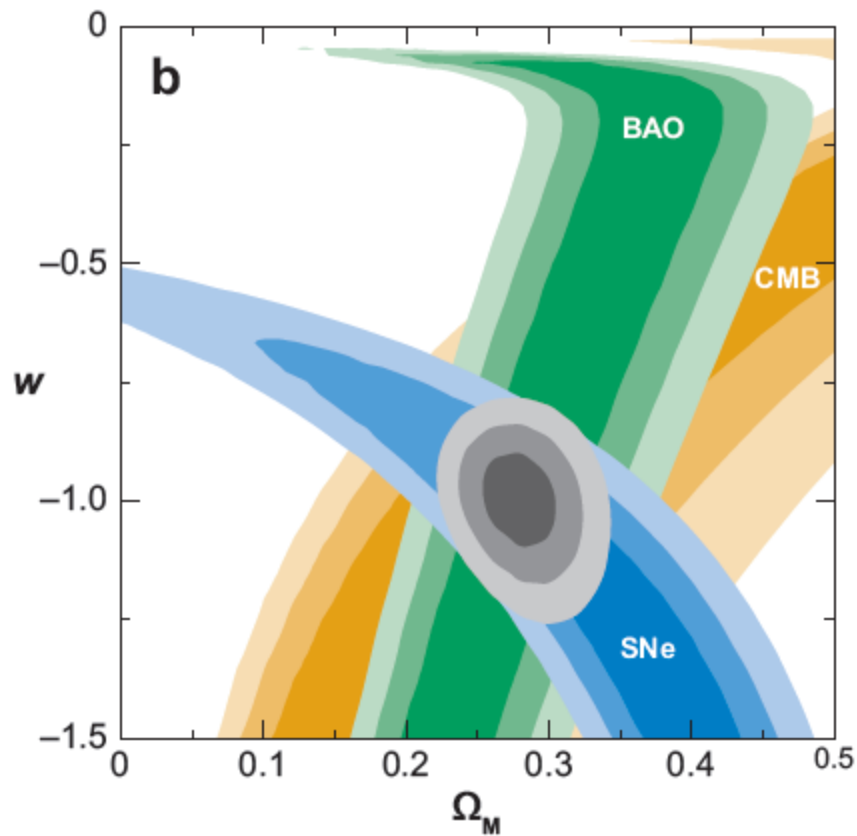
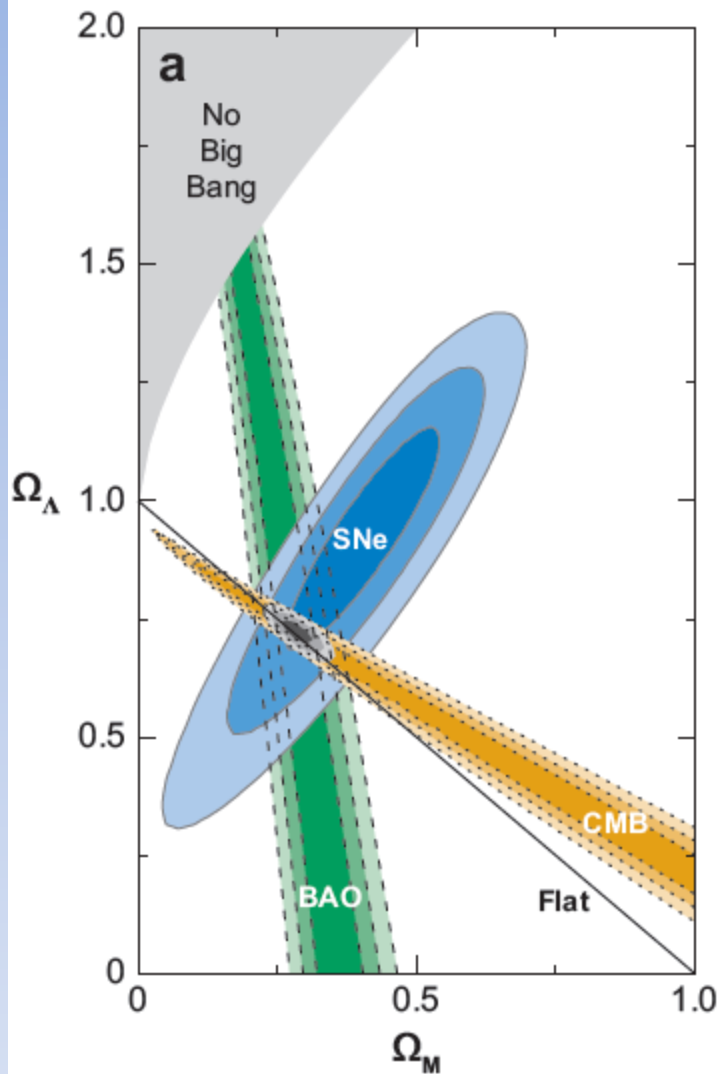
Sandage је (око 1970) написао: “Космологија се састоји у трагању за два броја H_0 и q_0 који су недоступни (*beyond reach*)”

Савремени космолошки модели (озбиљни) баратају са од 4 до 20 независних параметара.

За два главна модела, која разматрамо, значајна је следећа табела.

Параметар	Консензусни модел	<i>Bona fide</i> модел
Ω_0	$1,003 \pm 0,010$	1 (претпостављено)
Ω_{DE}	$0,757 \pm 0,021$	$0,757 \pm 0,020$
Ω_M	$0,246 \pm 0,028$	$0,243 \pm 0,020$
Ω_B	$0,042 \pm 0,002$	$0,042 \pm 0,002$
σ_8	$0,747 \pm 0,046$	$0,733 \pm 0,048$
n_s	$0,952 \pm 0,017$	$0,950 \pm 0,016$
H_0 (km(s(Mpc))	72 ± 5	72 ± 3
T_0 ($^{\circ}$ K)	$2,725 \pm 0,001$	$2,725 \pm 0,001$
t_0 (Gsg)	$13,9 \pm 0,6$	$13,8 \pm 0,2$
w	-1 (претпостављено)	$-0,940 \pm 0,1$
q_0	$0,64 \pm 0,03$	$0,57 \pm 0,1$

Tagemark et al. (2006) уз коришћење само CMB и SDSS



Протекла деценија и њени резултати као ограничења на главне космошке параметре, приказани за консезусни (лево) и *Bona fide* (десно) модел, уз укључивање података добијених “рачуном супернових”. *Kowalski et al. (2008)*

Минимални космолошки модел

Шта говоре посматрања ако се напусте све космолошке претпоставке осим *Friedmann*-ових једначина?

Ако се обједине консензусни и *bona fide* модел – дакле и w и закривљеност васионе могу да буду независни параметри – нормално, долази и до промена процене свих параметара као и до ширења граница грешке.

$$\Omega_0 = 1,026 \pm 0,016$$

H_0 се нађе у интервалу од 61 до 84 km/s/Mpc (ништа боље од *HST Key Project*-а)

$$w = -1,08 \pm 0,12$$

Додатно, иако су сви посматрачки резултати с складу са CDM парадигмом, ништа нас “не обавезује” у односу на тамну енергију.

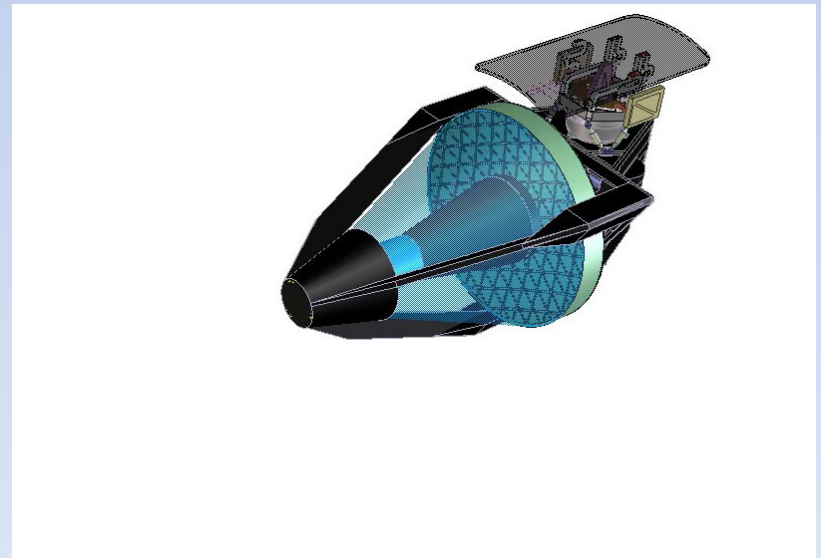
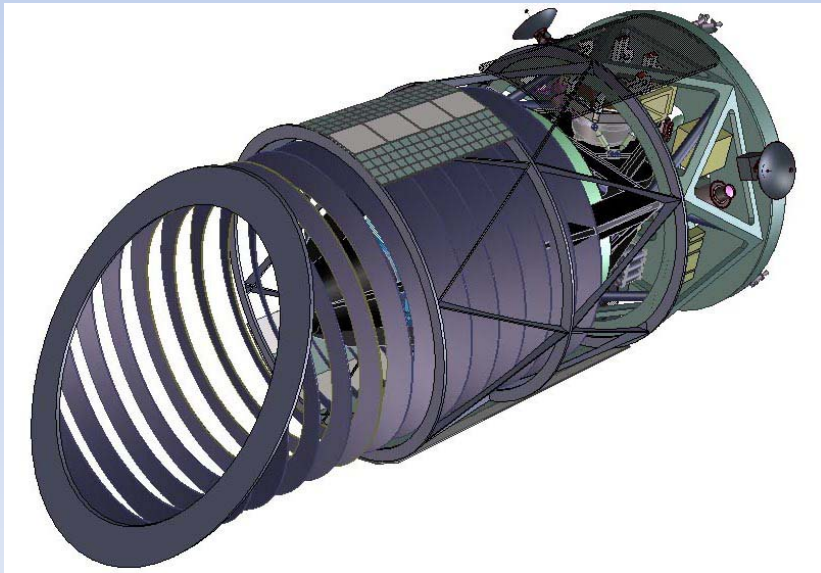
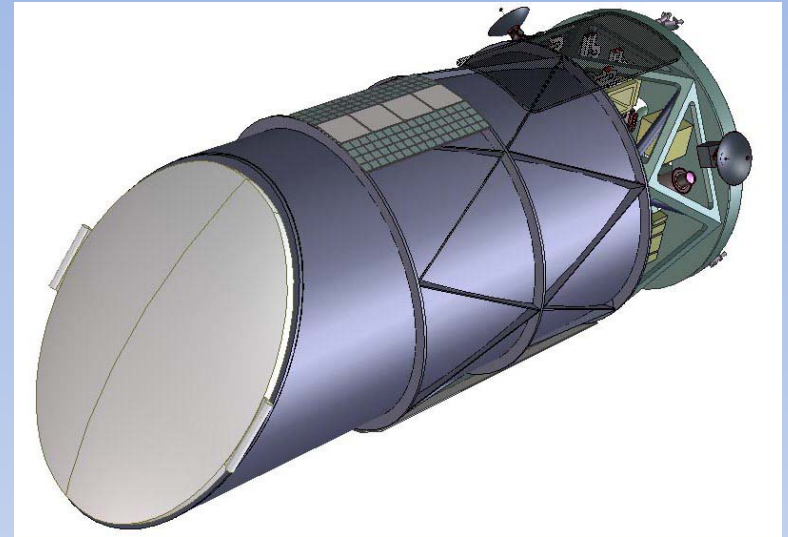
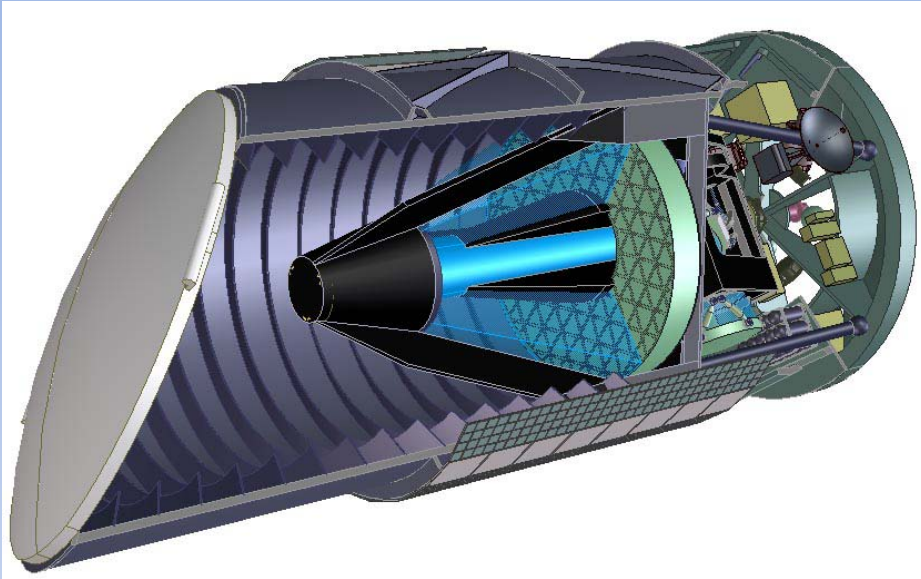
Долазе у обзир разноврсни егзотични модели у којима тамна енергија еволуира (као и њена густина или параметар једначине стања w)

Намеће се, дакле, потреба за новим посматрањима која ће интервал грешке за постојеће бројевне податке поправити за (бар) ред величине.

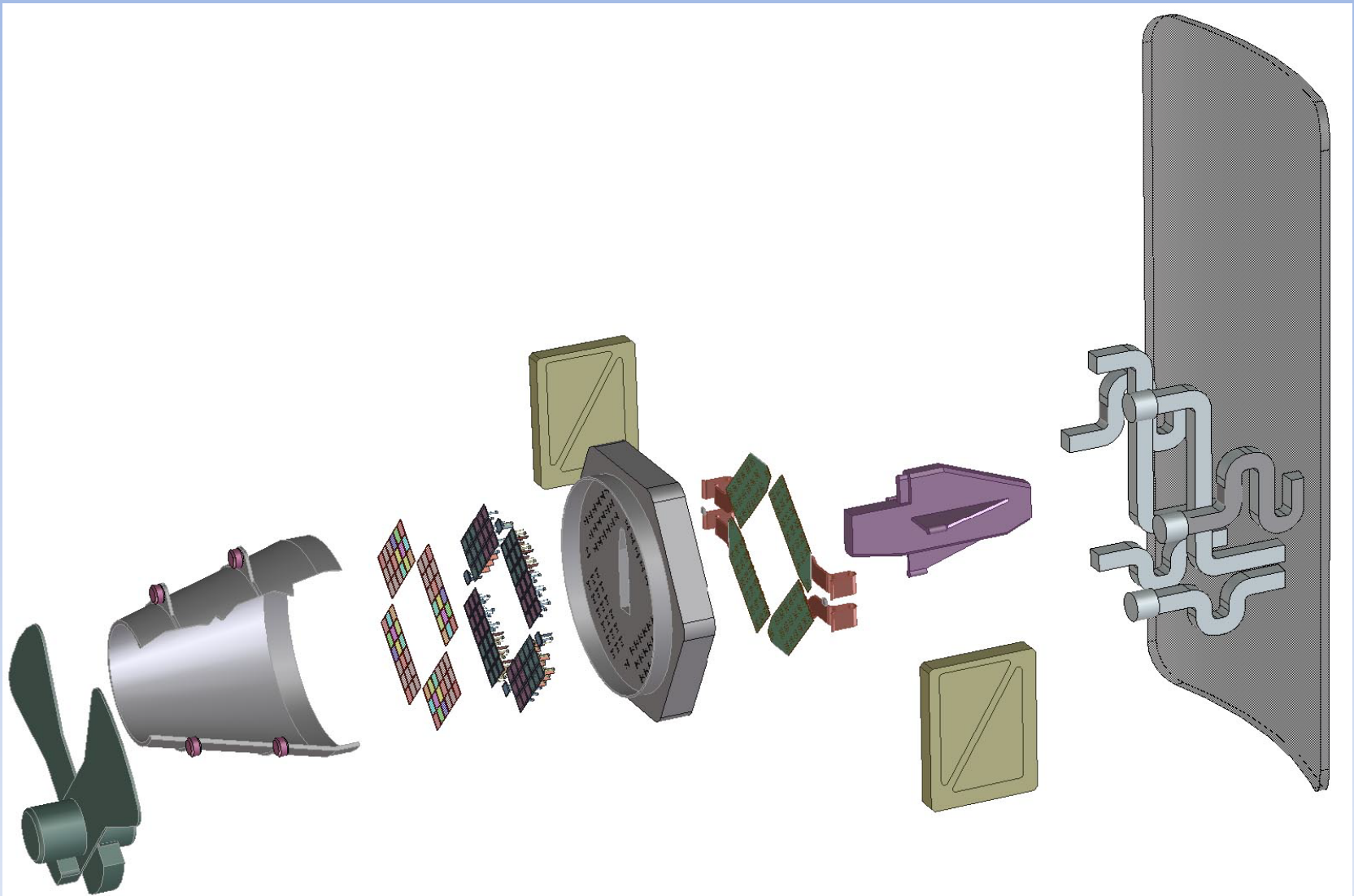
Посматрачки методи у разради и/или разматрању

Метод	Предности	Мане	Проблеми
WL	Раст структуре Геометрија структуре Статистички богато	CDM парадигма	Фотометријски Квалитет слике
SNe	Геометричност, звезде, зрелост	Претпоставка о стандардности	Еволуција , прашина
BAO	Геометричност, мала систематска грешка	Потребни велики узорци	Шум, нелинеарност
CL	Раст структуре, геометрија структуре, X-зраци+ SZ+оптика	CDM парадигма Скупо – потребни су сателити	Одређивање масе, критеријум селекције

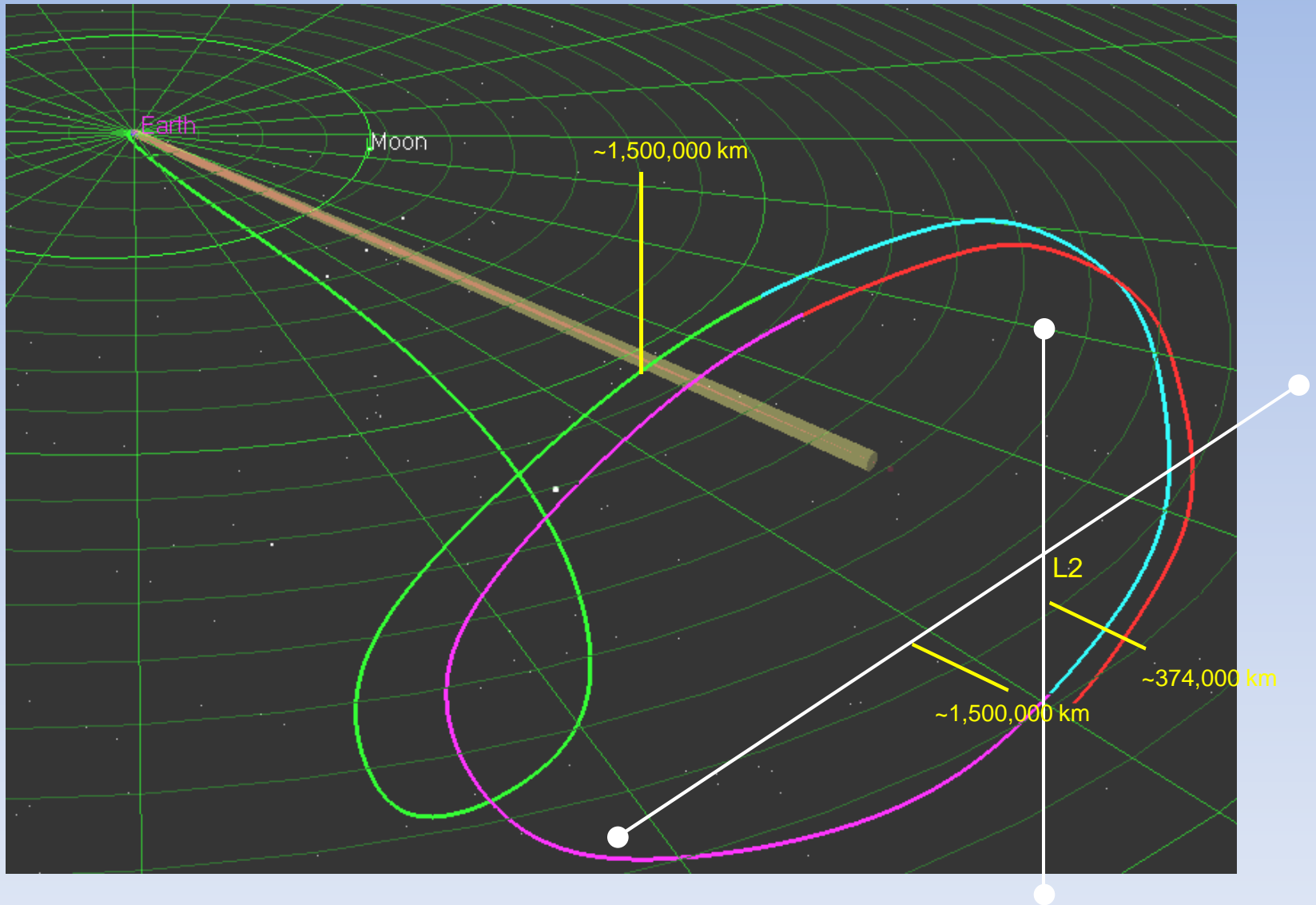
SNAP – Supernova Acceleration Probe



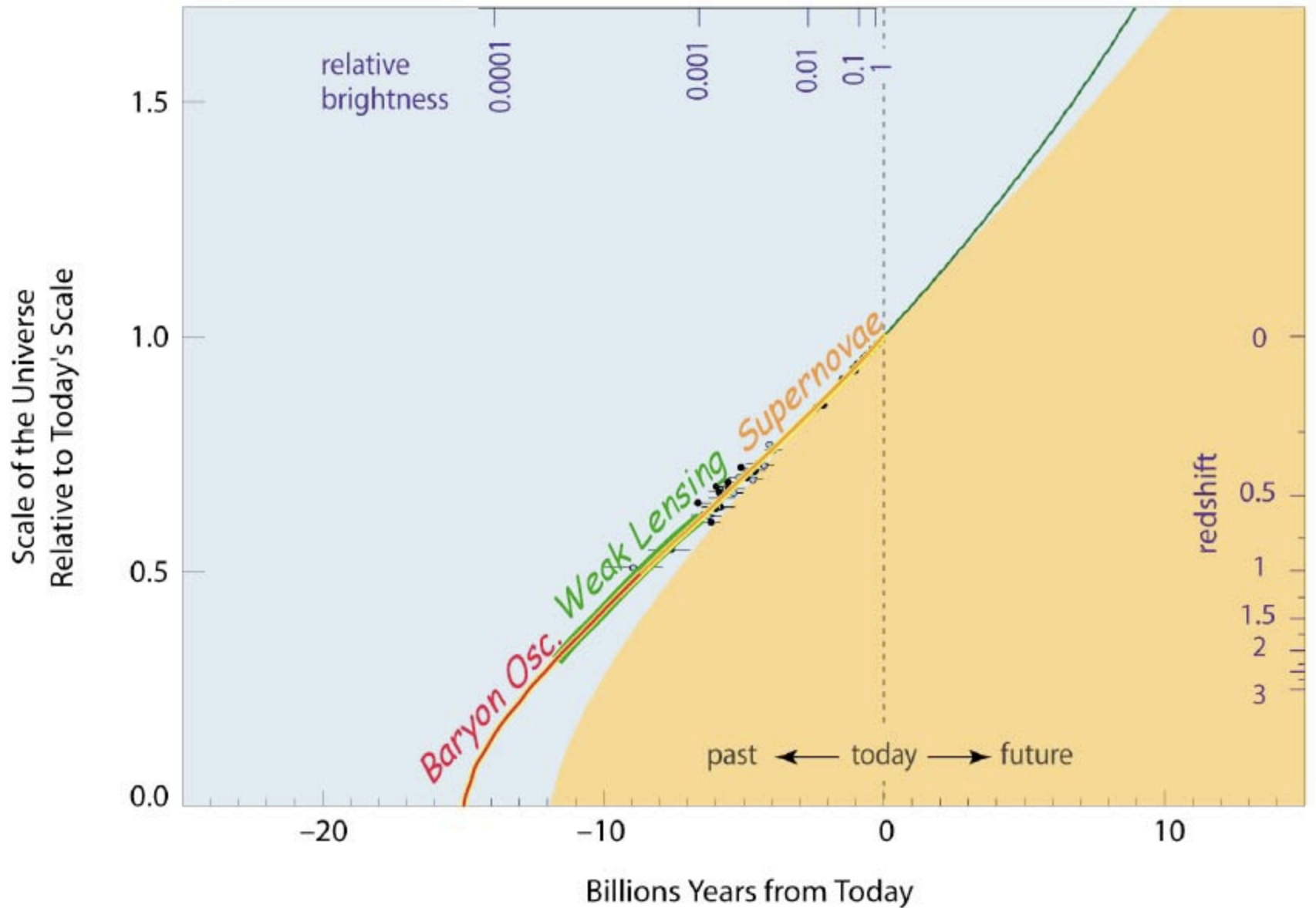
Инструмент

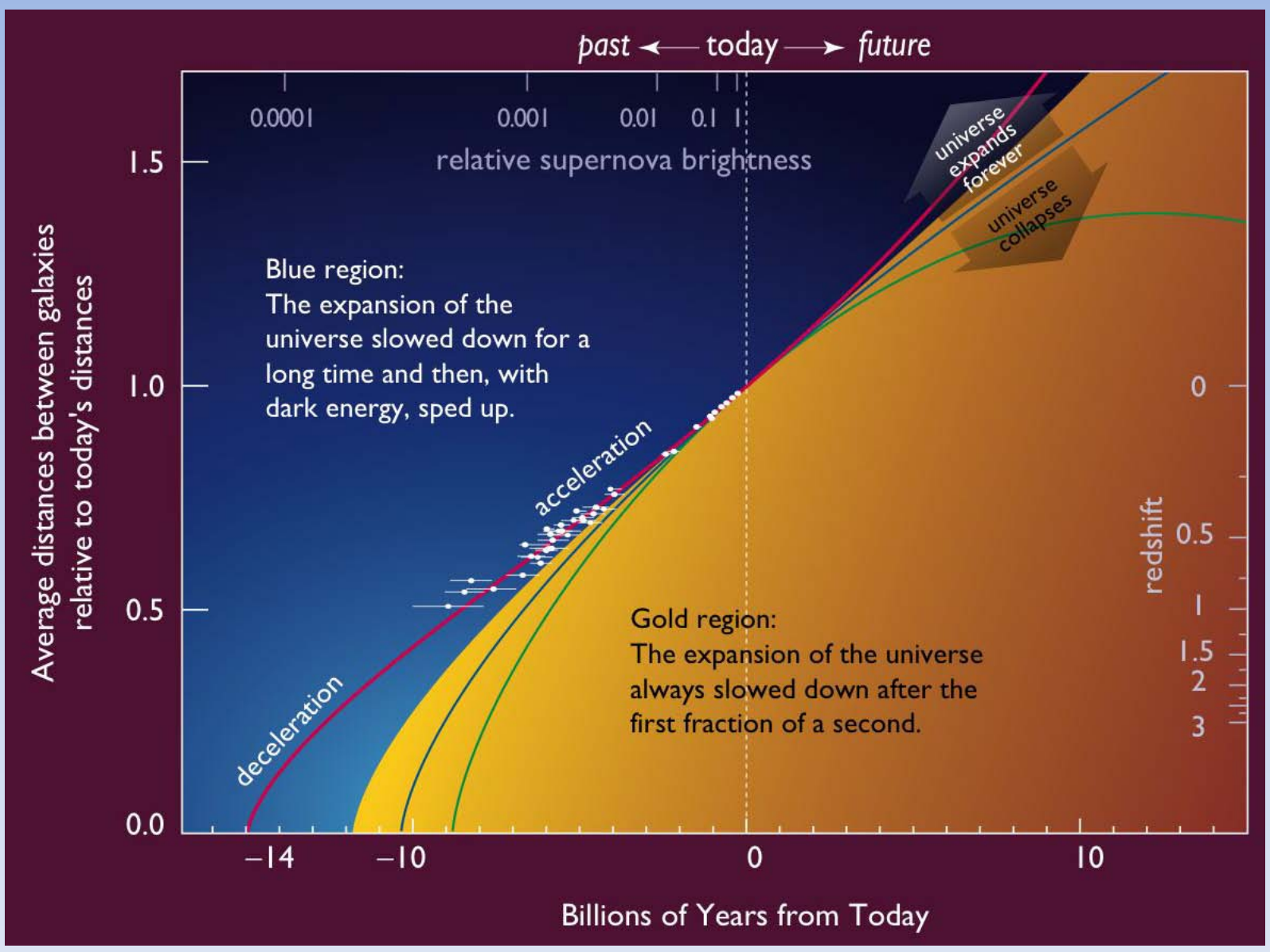


Орбита SNAP-a



Expansion History of the Universe





Најраспрострањенија тумачења феномена тамне енергије

1. Космолошка константа.

Најпростије тумачење, али без икакве физичке теорије која би га подржала.

2. Енергија вакуума

Добро мотивисано, математички еквивалентно космолошкој константи. Кључни проблем је у калкулацијама. Наиме

$$\rho_{VAC} = \frac{1}{2} \sum_{polja_0} \int \sqrt{k^2 + m^2} \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \cong \sum_{polja} \frac{g_i k_{max}^4}{(16\pi)^2}$$

Где је g позитивно за фермионе, а негативно за бозоне. Ако се суперсиметрија не нарушава ρ_{VAC} је 120 редова величине већа од тренутно процењене. Ако се нарушава, рецимо на 1TeV - а тешко да је мање пошто савремени акцелератори “не верују” SUSY - онда је “само” 60 редова величине већа!

3. Скаларно поље

Математички чисто, физички могуће. Разним калибрацијама може се повезати са инфлацијом, може и да осцилује у времену, чак и да се параметризује $w = w_0 + (1 - a)w_a$

Кључни проблем је у “инверзној антропоцентричности”. Честице, носиоци тог поља, би требало да имају енергије, или ефективну масу ако нема честица, од 10^{-42}GeV , а интеракције са обичном материјом 120 редова величине слабије од стандардних поља. Не постоји научно искуство које уме/може да се носи са тим сразмерама.

Екстравагантни и мање екстравагантни покушаји да се постојање тамне енергије оспори

1. Нема никакве тамне енергије. Супернове класе Ia мењају своје особине са растојањем (старошћу). Додатно, можда је главни модел ових супренових некоректан. Можда (статистички) значајан број звезда експлодира сударом. Коначно, можда присуство метала (никла и кобалта) мења карактеристике.
2. Нема никакве тамне енергије. Земља и њено “ближе окружење” или Космос тј. васиона унутар хоризонта догађаја су једна велика шупљина.
3. Неутрина су престала да буду релативистичка.
4. GR мора да се преиначи за GPc растојања.
5. Космолошке једначине садрже (знатно) више параметара од FRW+ Λ CDM консензус модела.
6. И шта год вам још падне напамет, а није директно фалсифицибилно (или, “да се рупа одмах не види”, М. Дражић, *Table talks*, Београд 2009, необјављено).

Да ли је (реално) могућа експериментална детекција тамне енергије независна од астрофизичких посматрања?

(Homage Martinu Perlu)

Бројевни подаци:

- Критична енергетска густина васионе је $\rho_c = 9 \times 10^{-10} \text{ J/m}^3 = 9 \times 10^{-9} \text{ erg/cm}^3$.
- “Одокативно” густина тамне енергије је 0,7 критичне густине што даје $\rho_{DE} = 6.3 \times 10^{-10} \text{ J/m}^3 = 6.3 \times 10^{-9} \text{ erg/cm}^3$.
- Барионски еквивалент је $0.70 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3 = 3.9 \text{ GeV}/c^2 / \text{m}^3 \sim 4 \text{ протона}/\text{m}^3 = 0,000004 \text{ протона}/\text{cm}^3$
- Густина гравитације, пак, на површини Земље је $\rho_G = g^2/(8\pi G_N) = 5.7 \times 10^{+10} \text{ J/m}^3 = 5.7 \times 10^{+11} \text{ erg/cm}^3$.
- Међутим, ми лако меримо електрична поља чији је градијент, рецимо, $E=1\text{V/m}$, па је еквивалента густина $\rho_E = \epsilon_0 E^2/2 = 4.4 \times 10^{-12} \text{ J/m}^3 = 4.4 \times 10^{-11} \text{ erg/cm}^3$.
- Дакле, сама густина енергије поља (?) тамне енергије не треба да нас брине.

Међутим:

1. За разлику од електромагнетног поља тамна енергија не може бити укључивана и искључивана
2. Претпоставке се углавном концентришу на униформну дистрибуцију тамне енергије. Али, могуће је да постоје региони са већом и мањом густином.
3. По већини модела тамна енергија не показује никакво деловање на материјалне објекте. Дакле, не види се начин да се детектује.
4. Ако појмови попут Планкове масе, дужине и осталих квантних феномена ипак (упркос 3) имају неке везе са тамном енергијом морају се битно ревидирати. Јер, критична фреквенција је 4THz, а (максимална) амплитуда Фурјеовог развоја мања од Планкове дужине!
5. Честице имају наелектрисање па се тако детектује електромагнетско поље. Имају и масу па се тако детектује гравитација. Која је то особина која је осетљива на тамну енергију? Да ли она може изазвати какав фазни помак у атому и открити се (рецимо) “атомским интерферометрима” (шта год то значило).
6. Густина тамне енергије у односу на густину гравитације на Земљи је 20 редова величине мања. Дакле, експерименти, ако уопште, се морају спроводити *далеко од Земље, па чак и довољно далеко од Сунца и планета.*
7. **Detonating a nuclear device within the city limits results in a \$500 fine** (*Chico, 1952, California, USA*)

“Да сам присуствовао стварању света, препоручио бих да га направе нешто једноставнијим.”

Алфонзо X, звани Мудри, покатакд и Учени, краљ Кастиље и Леона