

*Астрофизические методы исследования
возможного космологического изменения
фундаментальных физических констант*

А. В. Иванчик, Д.А. Варшалович,

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Дубна, ОИЯИ – 2009

◆ **Первичный Нуклеосинтез**

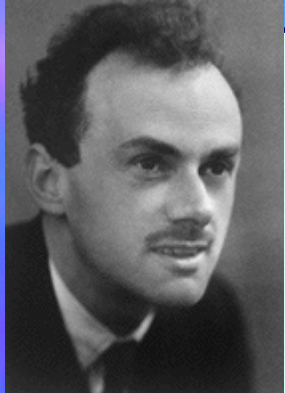
2. Реликтовое Излучение

3. Квазары

Мотивация

Феноменологическая

Теоретическая



Dirac, Nature 1937

$$G \sim t^{-1}$$

- Teller, Gamow (1948, 1967)

$$\alpha \sim t$$



...

- Многомерные теории

$$\alpha, \mu, \dots \sim V^D$$

- Теории Великого Объединения

$$\Delta\mu/\mu = \mathcal{R} \Delta\alpha/\alpha$$

- Суперструны/М-теория

$$g_s = e^\Phi \Leftrightarrow \alpha, \mu, \dots$$

“Темная Энергия”

Скалярные поля (и их эволюция) могут быть связаны с фундаментальными константами (и их вариациями)
(... М. Pospelov ...)

Современные наблюдательные результаты

Epoch	Reference	Constant	$\Delta x/x$	$\dot{x}/x$, yr^{-1}
“Now and Here”	2007 Fortier et al.	α	$(3.6 \pm 6.0) \times 10^{-15}$	$(-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-15}$
	2006 Peik et al.	α	$(1.6 \pm 2.3) \times 10^{-15}$	$(-0.3 \pm 0.4) \times 10^{-15}$
	2003 Bize et al.	α	$< 2.4 \times 10^{-15}$	$< 1.2 \times 10^{-15}$
	1995 Prestage et al.	α	$< 3.7 \times 10^{-14}$	$< 3.7 \times 10^{-14}$
“Oklo”	2006 Petrov et al.	α	$(0.1 \pm 0.7) \times 10^{-7}$	$(-0.5 \pm 3.5) \times 10^{-17}$
	2004 Lamoreaux et al.	α	$(4.5 \pm 0.2) \times 10^{-8}$	$(-2.3 \pm 0.1) \times 10^{-17}$
	2003 Fujii et al.	α	$(8.8 \pm 0.7) \times 10^{-8}$	$(-4.4 \pm 0.4) \times 10^{-17}$
“Q S O”	2007 Levshokov et al.	α	$(5.4 \pm 2.5) \times 10^{-6}$	$(-5.4 \pm 2.5) \times 10^{-16}$
	2004 Chand et al.	α	$(-0.6 \pm 0.6) \times 10^{-6}$	$(0.6 \pm 0.6) \times 10^{-16}$
	2003 Murphy et al.	α	$(-0.5 \pm 0.1) \times 10^{-5}$	$(6.4 \pm 1.4) \times 10^{-16}$
	1999 Webb et al.	α	$(-1.1 \pm 0.4) \times 10^{-5}$	$(2.2 \pm 5.1) \times 10^{-16}$
	2006 Reinhold et al.	μ	$(2.0 \pm 0.6) \times 10^{-5}$	$(2.0 \pm 0.6) \times 10^{-15}$
	2005 Ivanchik et al.	μ	$(1.7 \pm 0.7) \times 10^{-5}$	$(1.7 \pm 0.7) \times 10^{-15}$
	2005 Kanekar et al.	μ	$< 1.4 \times 10^{-5}$	$< 2.1 \times 10^{-15}$
	1995 Cowie & Songaila	μ	$(0.8 \pm 6.3) \times 10^{-4}$	$(0.8 \pm 6.3) \times 10^{-14}$
	2007 Tzanavaris et al.	$\alpha^2 g_p \mu^{-1}$	$(0.6 \pm 2.0) \times 10^{-5}$	$(0.6 \pm 2.0) \times 10^{-15}$
	1995 Cowie & Songaila	$\alpha^2 g_p \mu^{-1}$	$(0.7 \pm 1.1) \times 10^{-5}$	$(0.7 \pm 1.1) \times 10^{-15}$

В чем преимущество астрофизических методов
по сравнению с
прецизионными лабораторными наблюдениями ?

Используя спектры квазаров, астрофизики могут изучать
«физику», существовавшую млрд. лет назад.

Лабораторные измерения

$$\frac{\Delta\mu}{\mu}$$

измеряется с прецизионной
точностью $\sim 10^{-15}$ (!)

несколько
дней
месяцев
лет

т.е. $\Delta t \sim 10$ лет

$$\frac{\Delta\mu}{\Delta t} - ?$$

Астрономические измерения

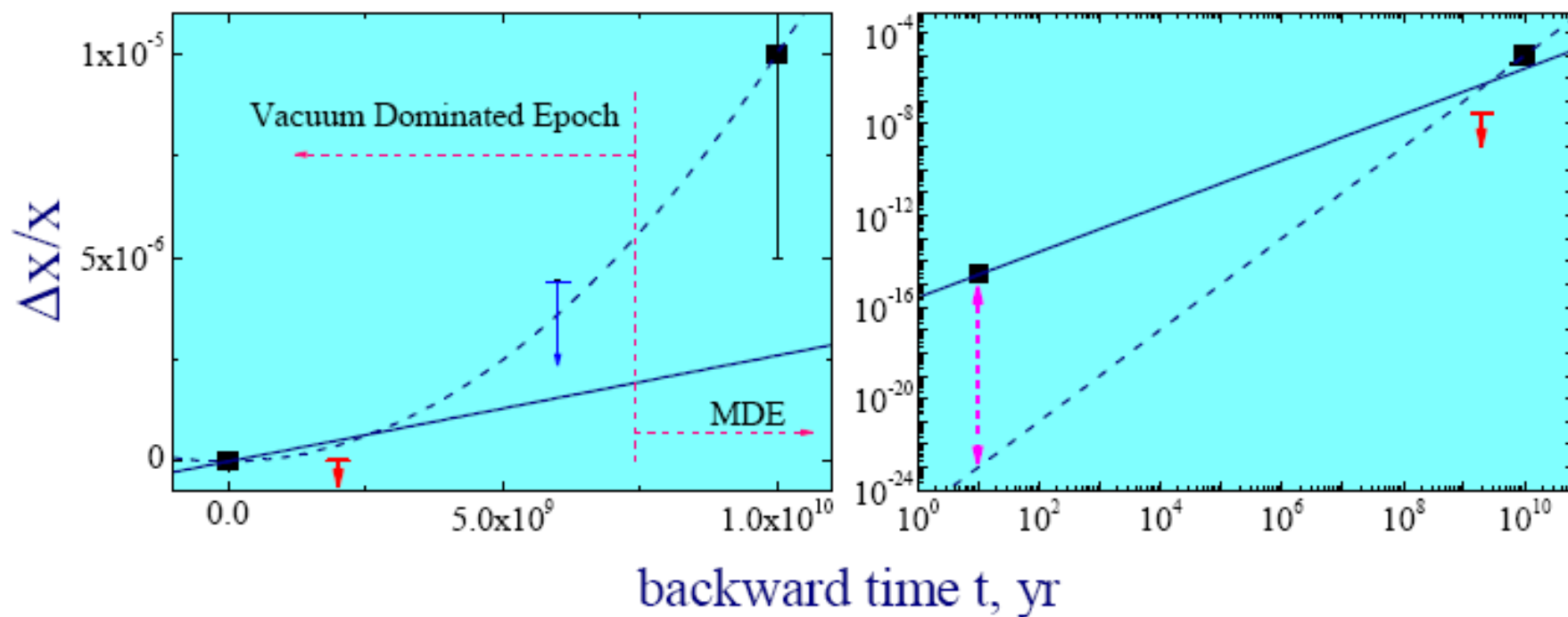
точность измерения $\frac{\Delta\mu}{\mu}$
 $\sim 10^{-5}$

НО

космологические времена

$\Delta t = 10 - 14$ млрд. лет

$$\Delta\mu/\mu=f(t)= a_0(=0) + a_1t + a_2t^2 + \dots$$



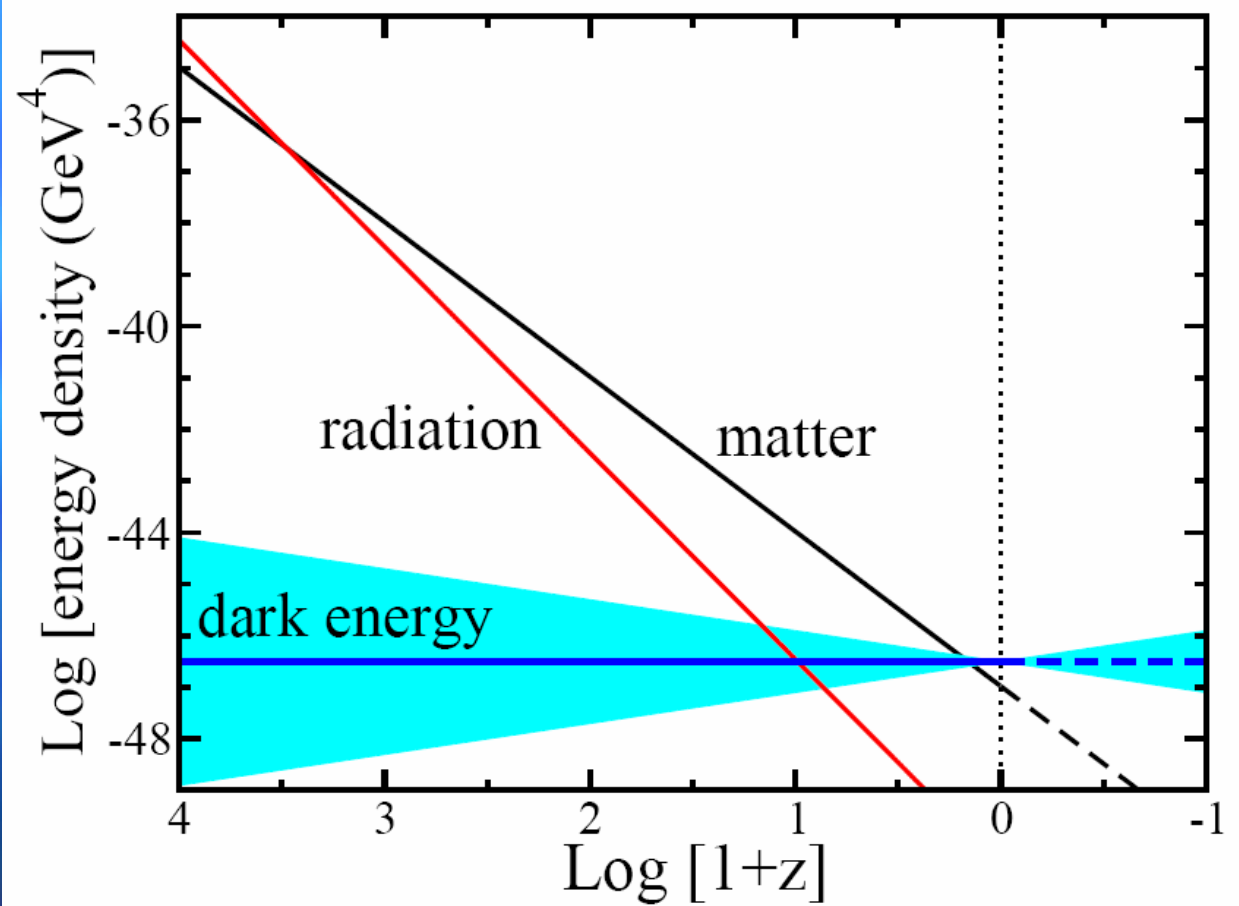
Уравнения состояния материи. Различные космологические эпохи.

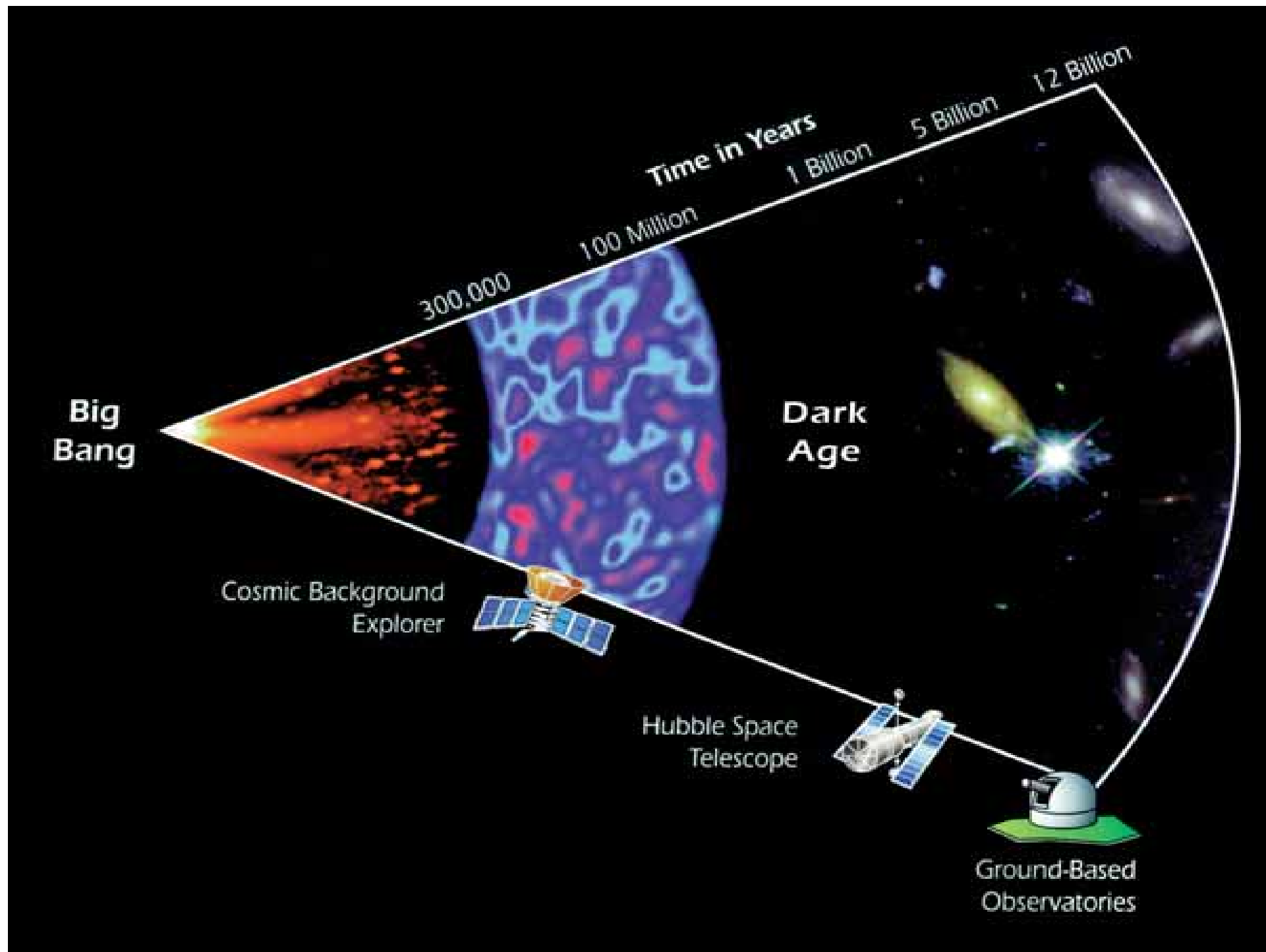
$$p = w\rho$$

$$w = 1/3$$

$$w = 0$$

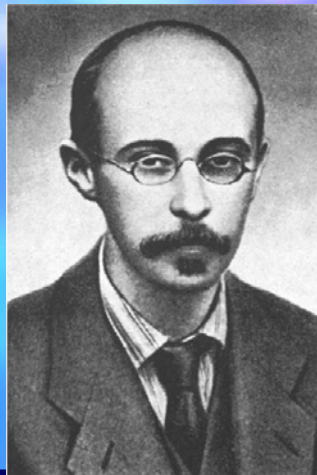
$$w < 0$$



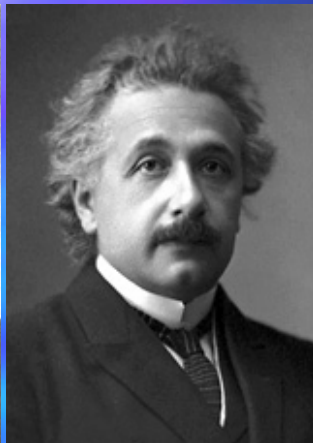




1929: Edwin Hubble



Albert Einstein



Precision Cosmology

1929

$H_0 \approx 500$
km/c/Mpc

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02^{+0.02}_{-0.02}$$

$$w < -0.78 \text{ (95\% CL)}$$

$$\Omega_{\Lambda} = 0.73^{+0.04}_{-0.04}$$

$$\Omega_b h^2 = 0.0224^{+0.0009}_{-0.0009}$$

$$\Omega_b = 0.044^{+0.004}_{-0.004}$$

$$n_b = 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$$

$$\Omega_m h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$$

$$\Omega_m = 0.27^{+0.04}_{-0.04}$$

$$\Omega_{\nu} h^2 < 0.0076 \text{ (95\% CL)}$$

$$m_{\nu} < 0.23 \text{ eV (95\% CL)}$$

$$T_{\text{cmb}} = 2.725^{+0.002}_{-0.002} \text{ K}$$

$$n_{\gamma} = 410.4^{+0.9}_{-0.9} \text{ cm}^{-3}$$

$$\eta = 6.1 \times 10^{-10} \text{ }^{+0.3 \times 10^{-10}}_{-0.2 \times 10^{-10}}$$

$$\Omega_b \Omega_m^{-1} = 0.17^{+0.01}_{-0.01}$$

$$\sigma_8 = 0.84^{+0.04}_{-0.04} \text{ Mpc}$$

$$\sigma_8 \Omega_m^{0.5} = 0.44^{+0.04}_{-0.05}$$

$$A = 0.833^{+0.086}_{-0.083}$$

$$n_s = 0.93^{+0.03}_{-0.03}$$

$$dn_s/d \ln k = -0.031^{+0.016}_{-0.018}$$

$$r < 0.71 \text{ (95\% CL)}$$

$$z_{\text{dec}} = 1089^{+1}_{-1}$$

$$\Delta z_{\text{dec}} = 195^{+2}_{-2}$$

$$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$$

$$t_0 = 13.7^{+0.2}_{-0.2} \text{ Gyr}$$

$$t_{\text{dec}} = 379^{+8}_{-7} \text{ kyr}$$

$$t_r = 180^{+220}_{-80} \text{ Myr (95\% CL)}$$

$$\Delta t_{\text{dec}} = 118^{+3}_{-2} \text{ kyr}$$

$$z_{\text{eq}} = 3233^{+194}_{-210}$$

$$\tau = 0.17^{+0.04}_{-0.04}$$

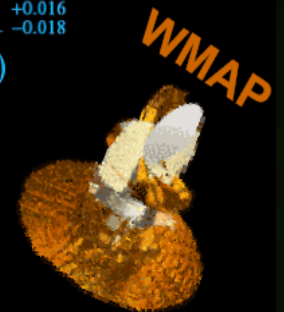
$$z_r = 20^{+10}_{-9} \text{ (95\% CL)}$$

$$\theta_{\Lambda} = 0.598^{+0.002}_{-0.002}$$

$$d_{\Lambda} = 14.0^{+0.2}_{-0.3} \text{ Gpc}$$

$$l_{\Lambda} = 301^{+1}_{-1}$$

$$r_s = 147^{+2}_{-2} \text{ Mpc}$$

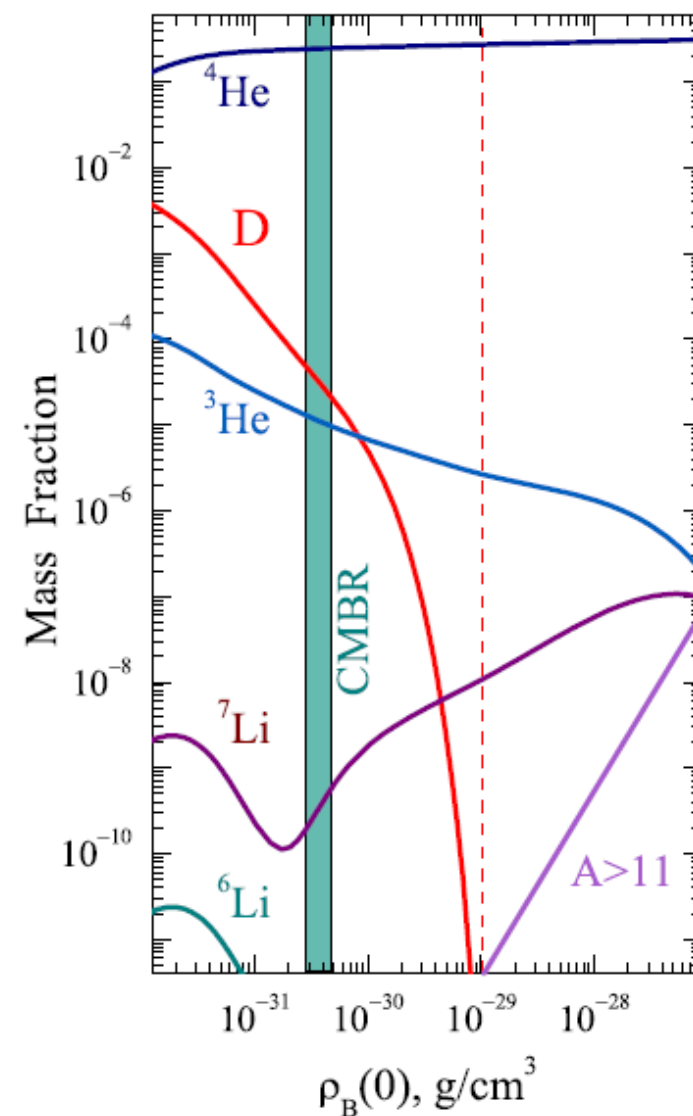
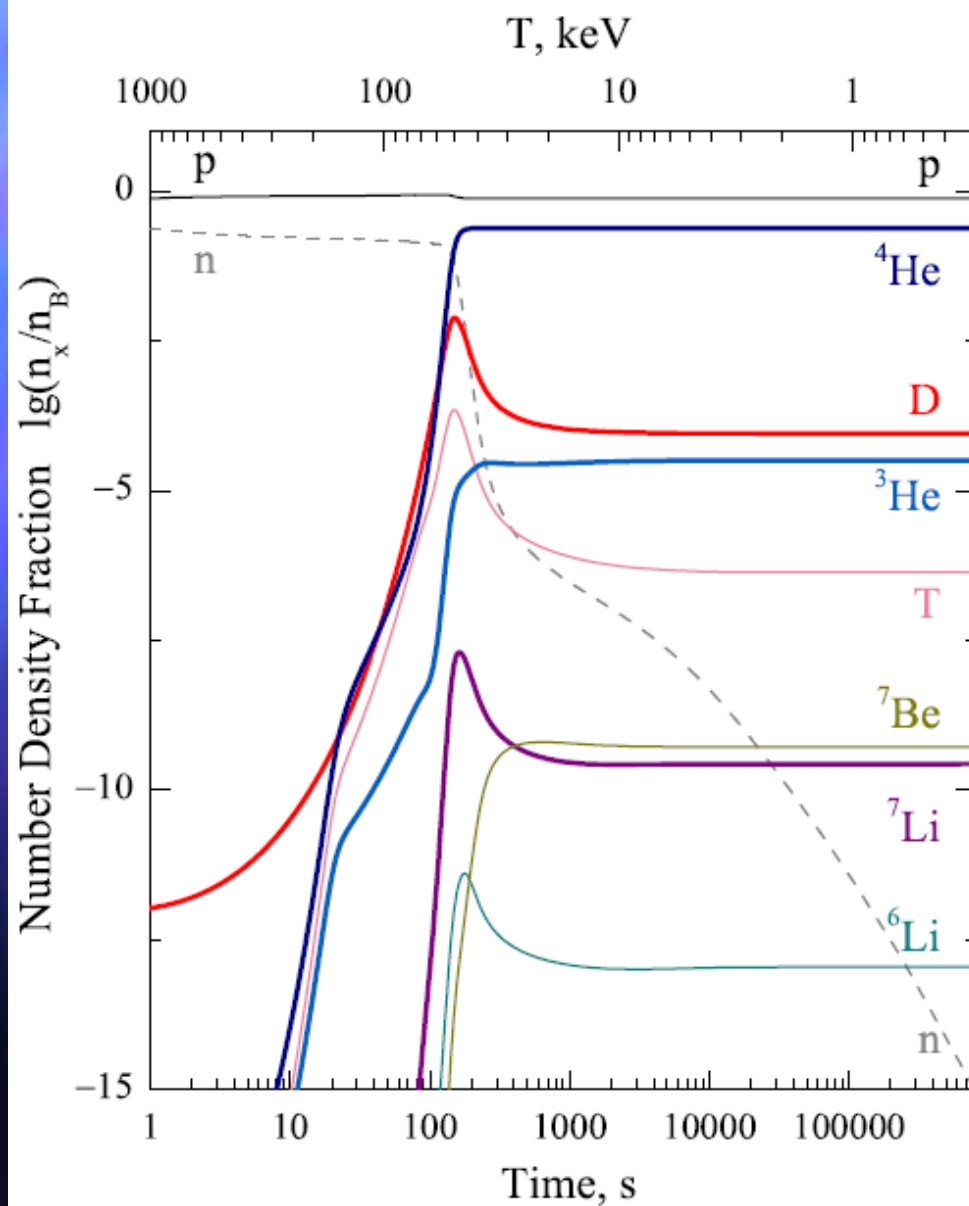


1. Первичный Нуклеосинтез

$$Z \sim 10^9$$

$$t \sim 3 \text{ мин}$$

Первичный нуклеосинтез



Вариация констант в эпоху РН

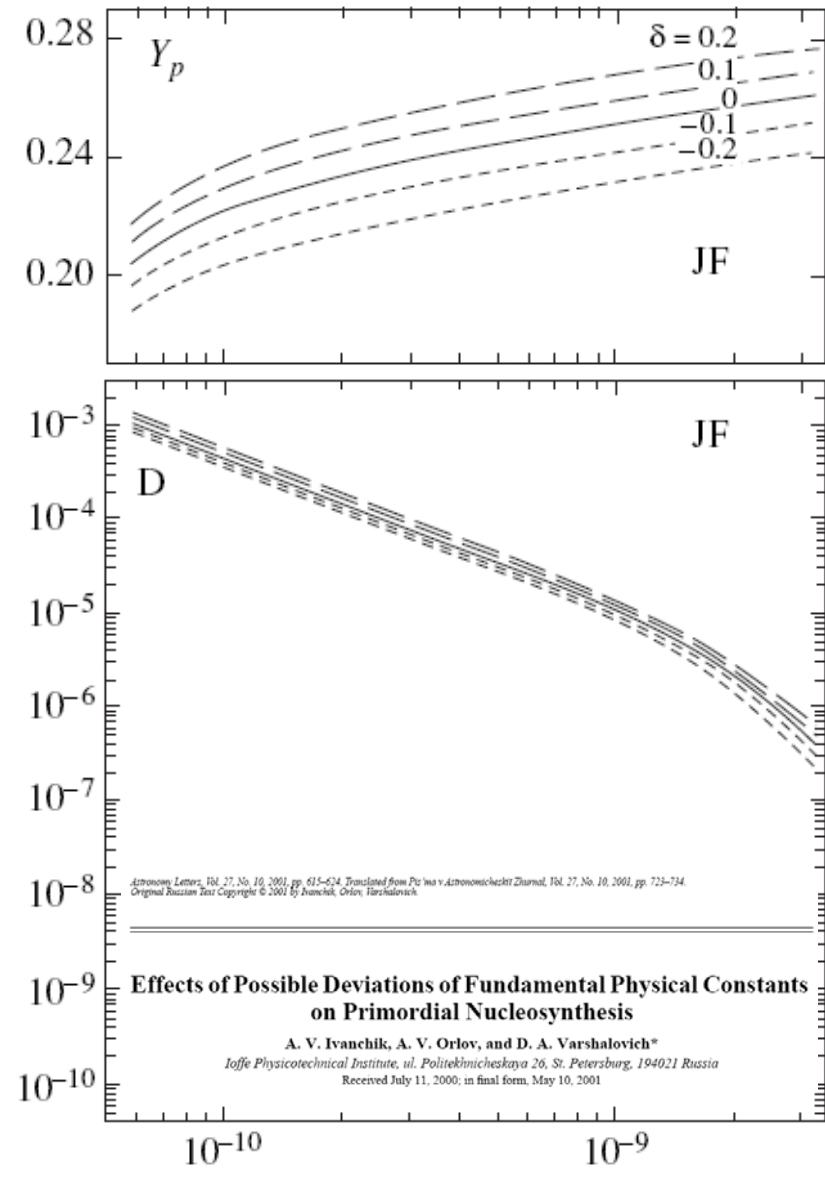
E.W.Kolb, M.J. Perry, & T.P. Walker
PRD 33, (1986)

$$Y_p \approx \frac{2(n/p)_f}{1 + (n/p)_f} \exp(-\Delta t/\tau_n), \quad (7)$$

where $(n/p)_f = (-Q/T_f)$. Therefore, a change in α , m_e , Q , τ_n , or G_F causes a change in Y_p and, naturally, in the relative abundances of other nuclei.

$$\frac{\delta \Delta m_{np}}{\Delta m_{np}} = -0.587 \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0} + 1.587 \frac{\Delta \langle v \rangle}{\langle v \rangle_0}$$

$$\Delta x/x < 10\%$$



2. Реликтовое Излучение (CMBR)

$$Z \sim 1400$$

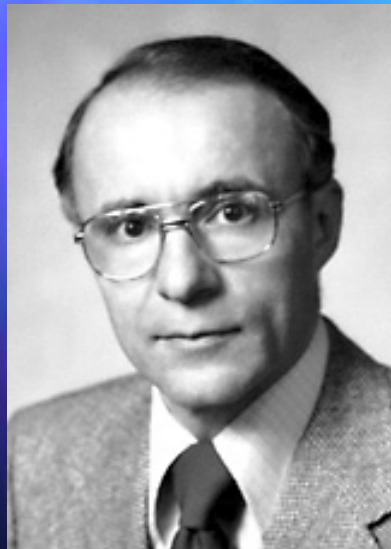
$$t \sim 400\ 000 \text{ лет}$$



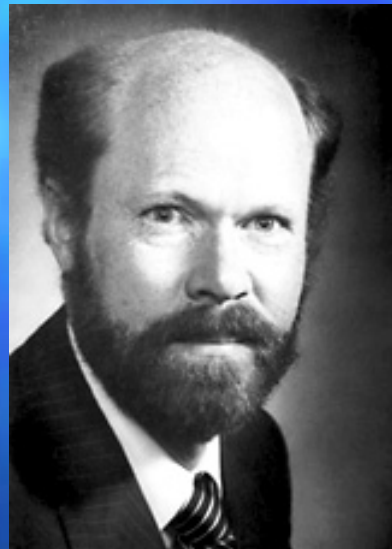
The Nobel Prize in Physics

1978

for their discovery of the
cosmic microwave background
radiation



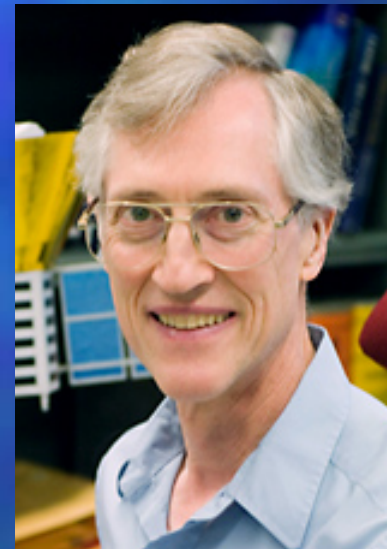
Arno A. Penzias
1/4 of the prize
USA



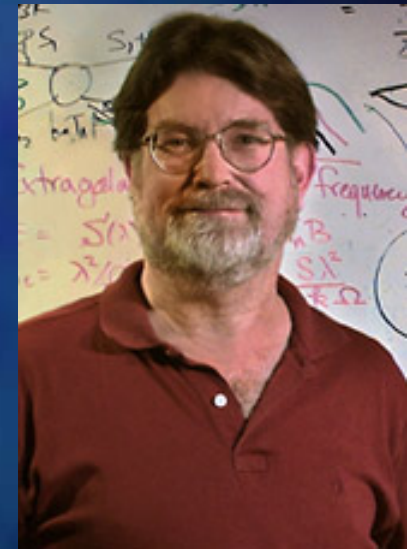
Robert W. Wilson
1/4 of the prize
USA

2006

for their discovery of the
blackbody form and anisotropy
of the cosmic microwave
background radiation



John C. Mather
1/2 of the prize
USA

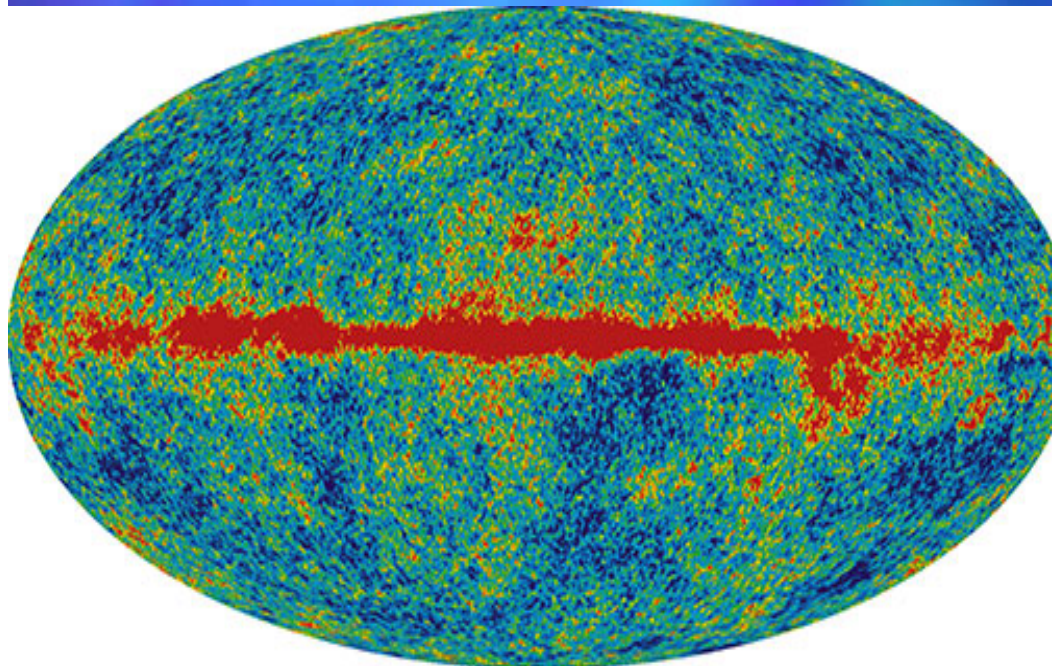
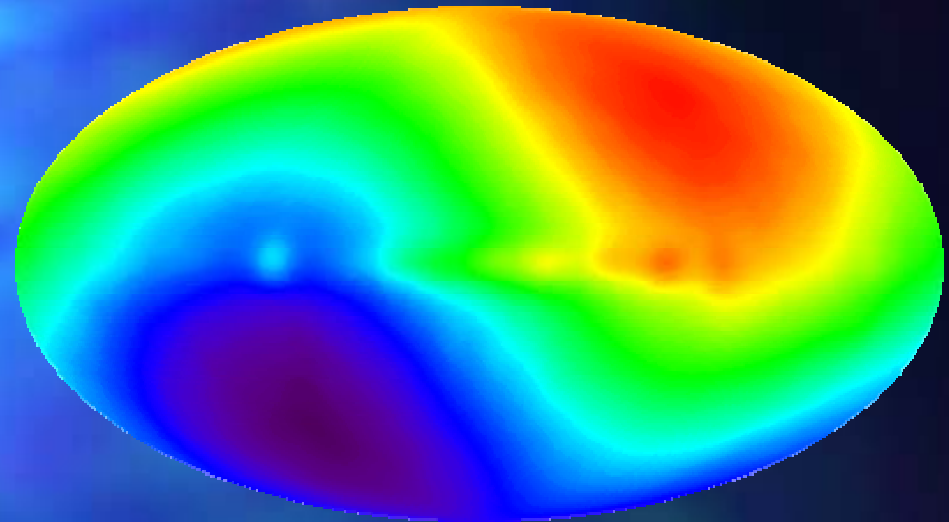


George F. Smoot
1/2 of the prize
USA

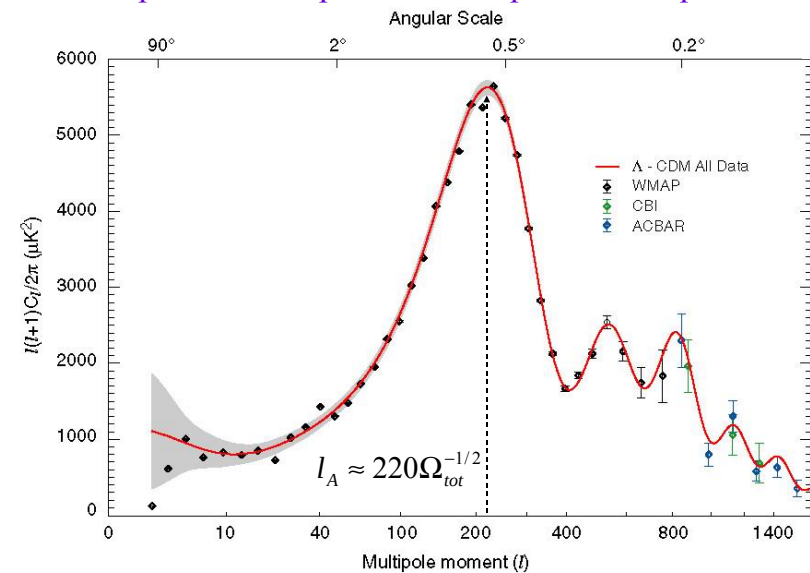
Карты анизотропии РИ

$$\Delta T_{dip} = 3.346 \pm 0.017 \text{ mK}$$

$$V = 368 \pm 2 \text{ km/sec}$$



Анизотропия РИ: Сравнение теории и эксперимента



Вариация констант в эпоху CMBR

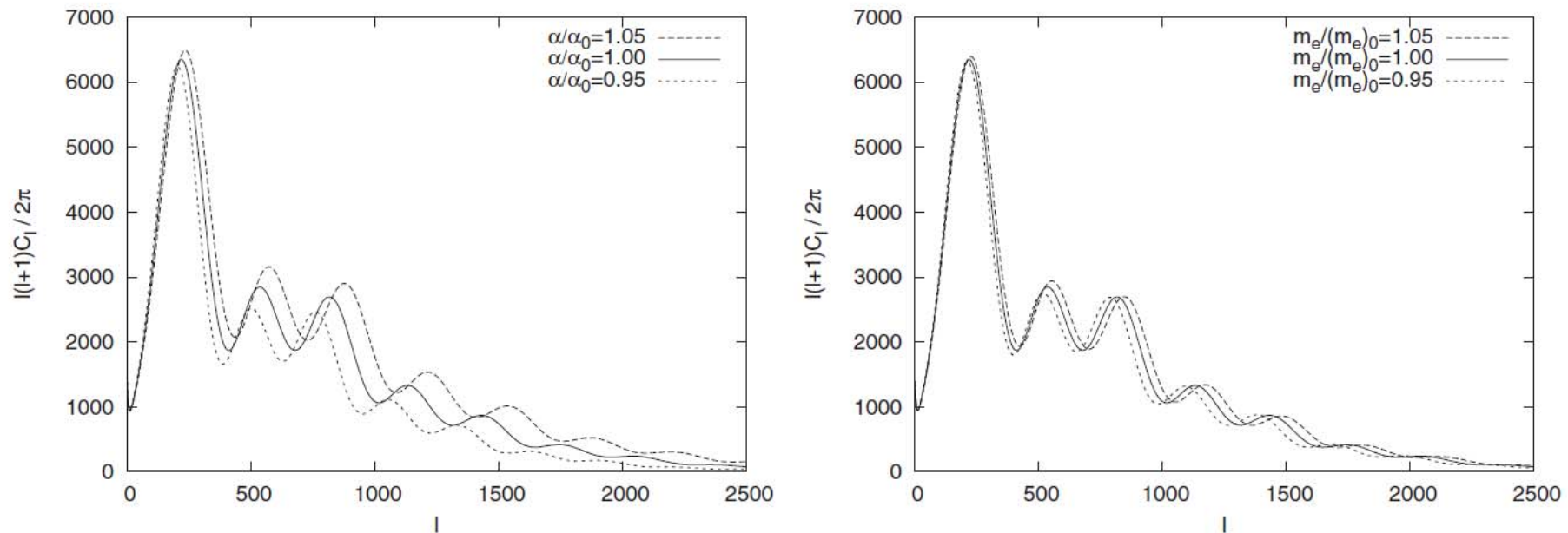


FIG. 7. The spectrum of CMB fluctuations for different values of α (left panel) and m_e (right panel).

PHYSICAL REVIEW D **78**, 083527 (2008)

Early universe constraints on time variation of fundamental constants

Susana J. Landau

Departamento de Física, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria-Pabellón 1, 1428 Buenos Aires, Argentina

Mercedes E. Mosquera

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N 1900 La Plata, Argentina

Claudia G. Scóccola

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N 1900 La Plata, Argentina and Instituto de Astrofísica, Paseo del Bosque S/N 1900 La Plata, Argentina

Héctor Vucetich

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N 1900 La Plata, Argentina
(Received 20 November 2007; revised manuscript received 24 July 2008; published 20 October 2008)

$$\Delta x/x < 7\%$$

3.

Квазары

$$Z \sim 2 - 4$$

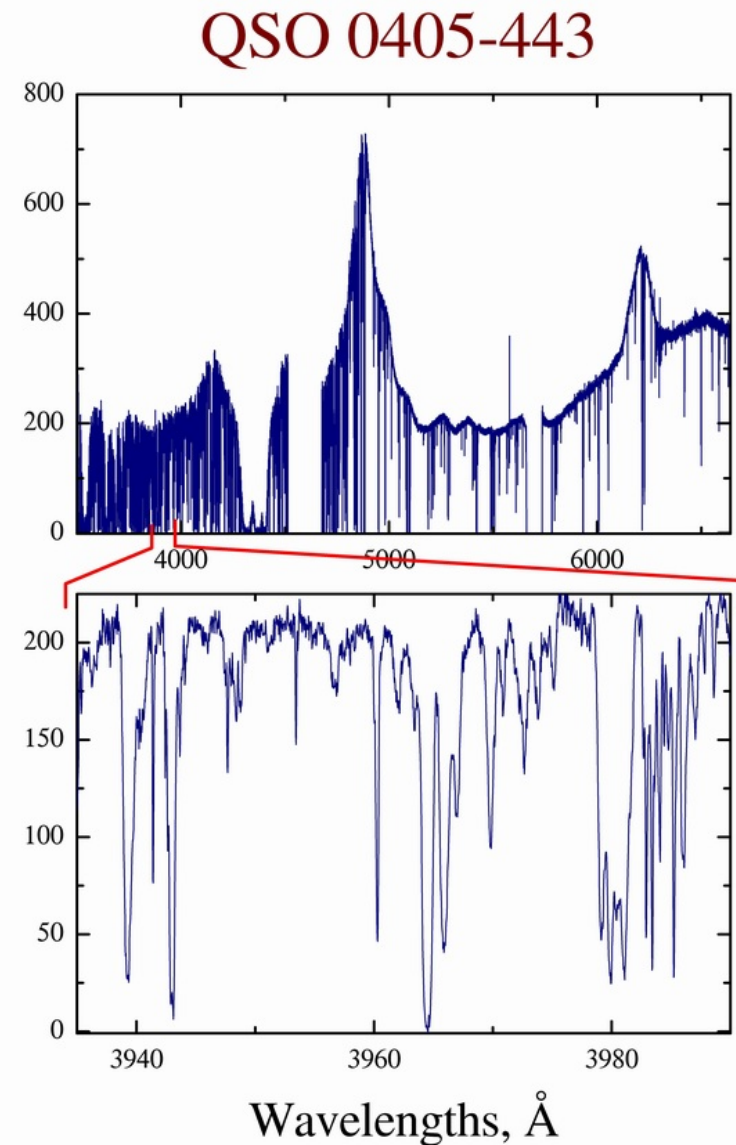
$$t \sim 10 - 12 \text{ млрд. лет}$$

Почему именно спектры квазаров ?

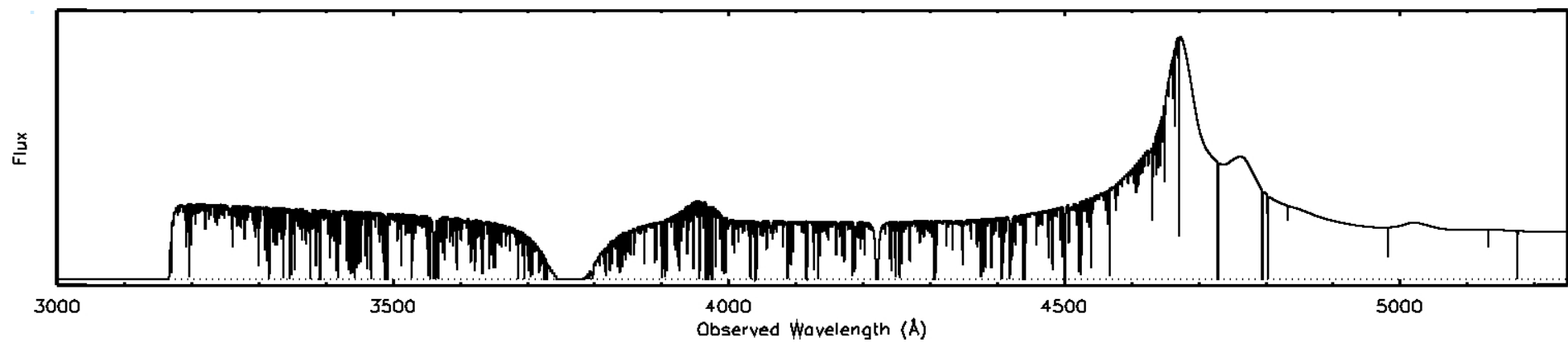
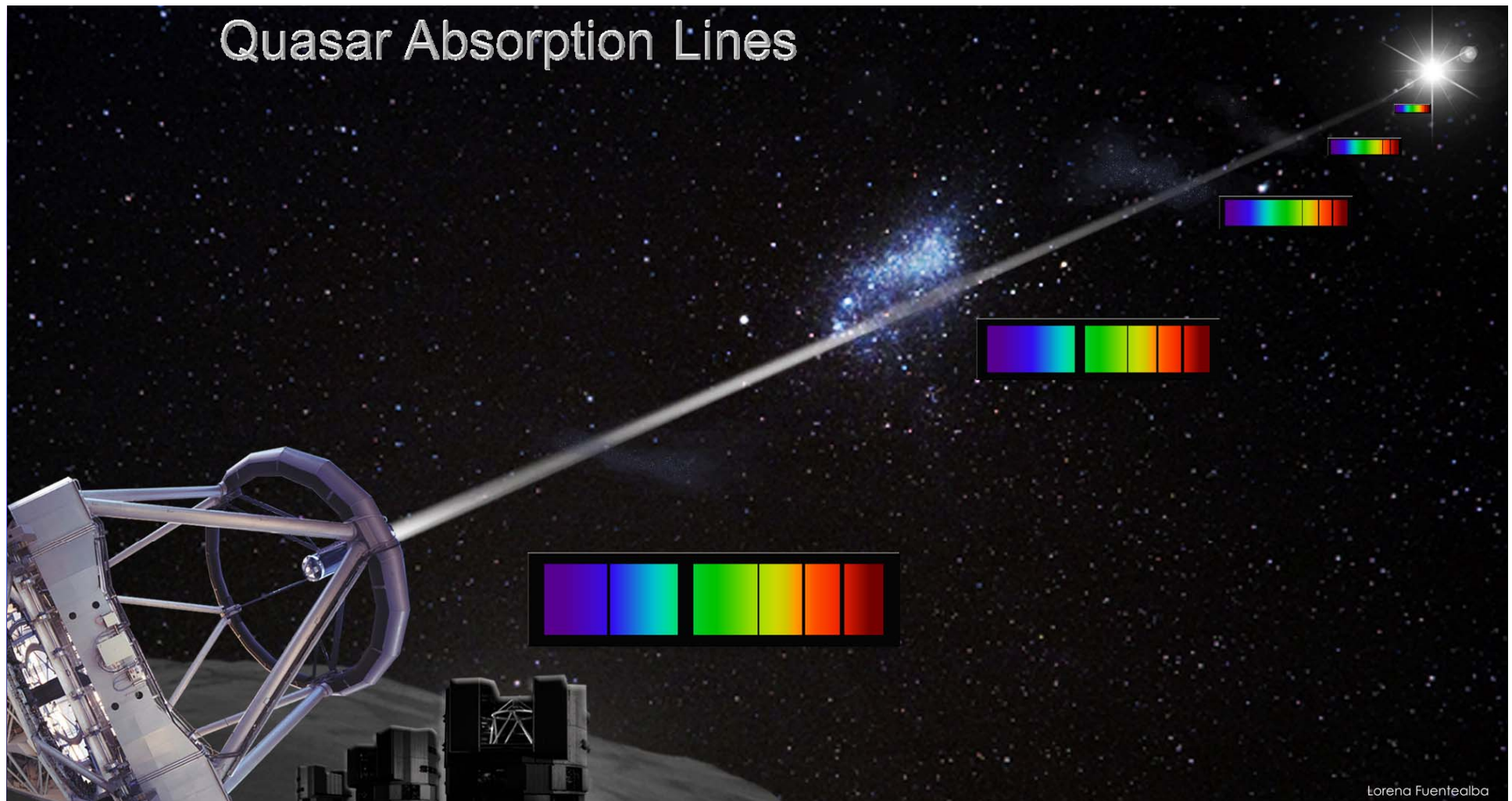
Квазары наиболее яркие из удаленных источников излучения во Вселенной (**Гамма вспышки**).

Следовательно, свет, распространяясь от квазара к наблюдателю, несет нам информацию о ранних эпохах эволюции Вселенной (10-14 млрд. лет назад).

Т.е. спектр квазара, по сути, является пространственно временной фотографией Вселенной.



Quasar Absorption Lines

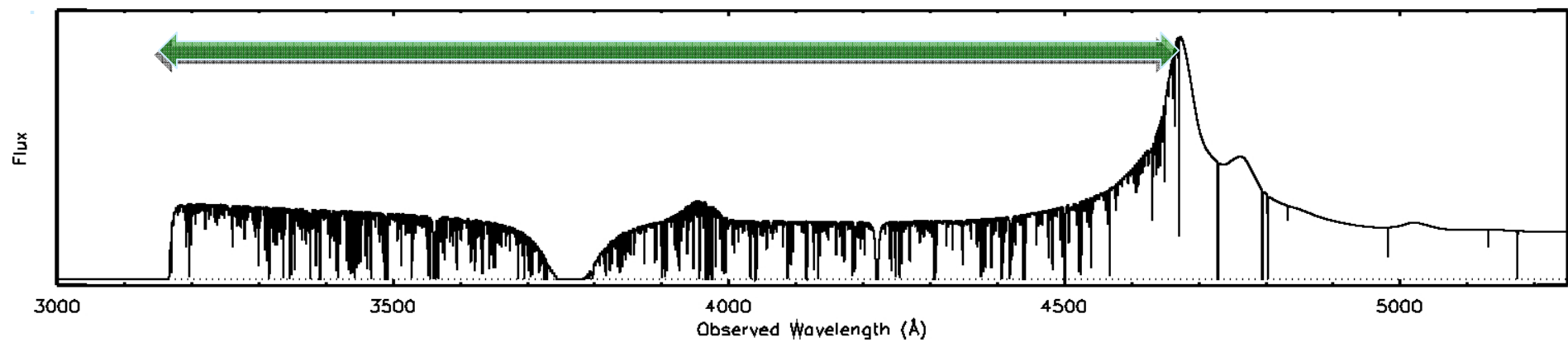


Quasar Absorption Lines

Lyman-alpha
forest:

$N(\text{HI}) \sim 10^{14} \text{cm}^{-2}$

Intergalactic
medium



Quasar Absorption Lines

Lyman-alpha
forest:

$N(\text{HI}) \sim 10^{14} \text{cm}^{-2}$

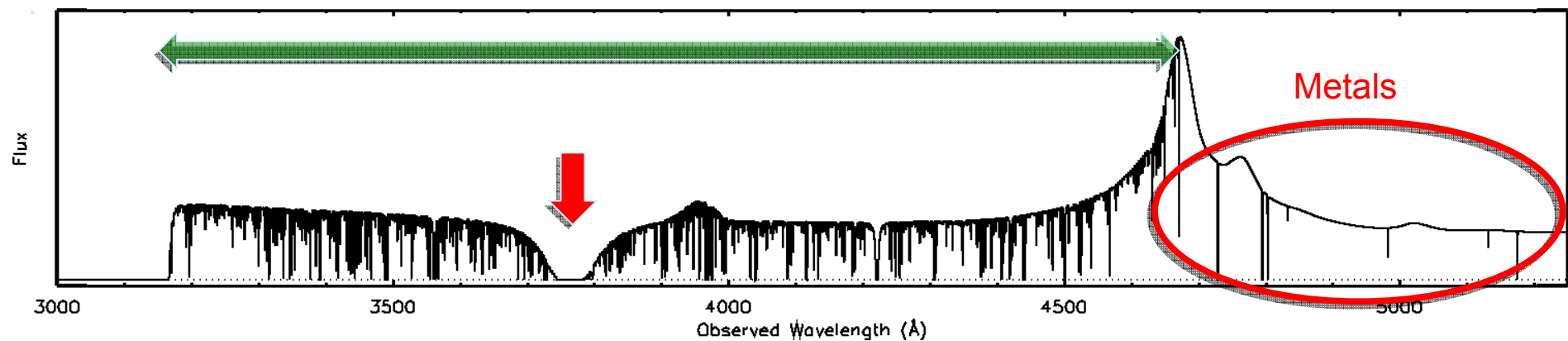
Intergalactic
medium

Damped Lyman-Alpha systems
(DLAs):

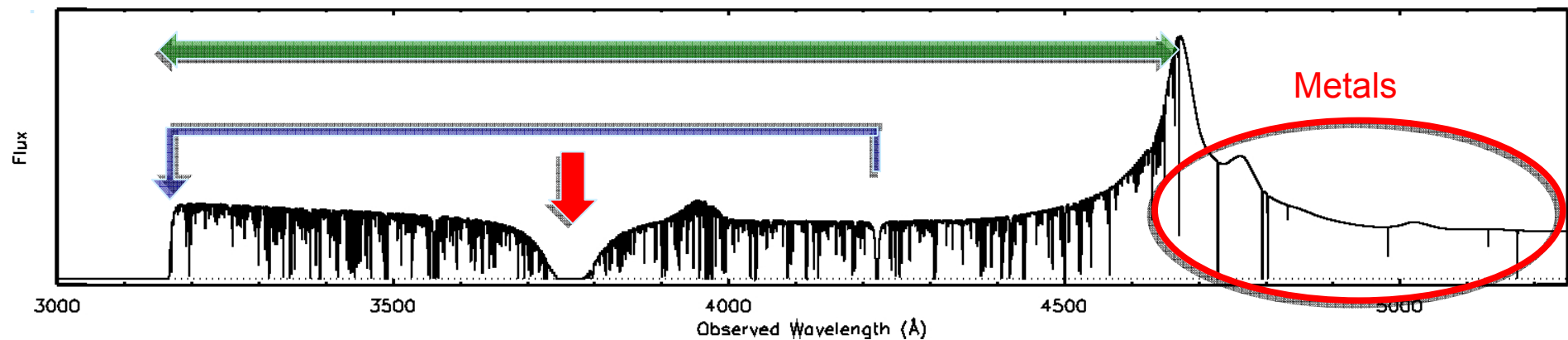
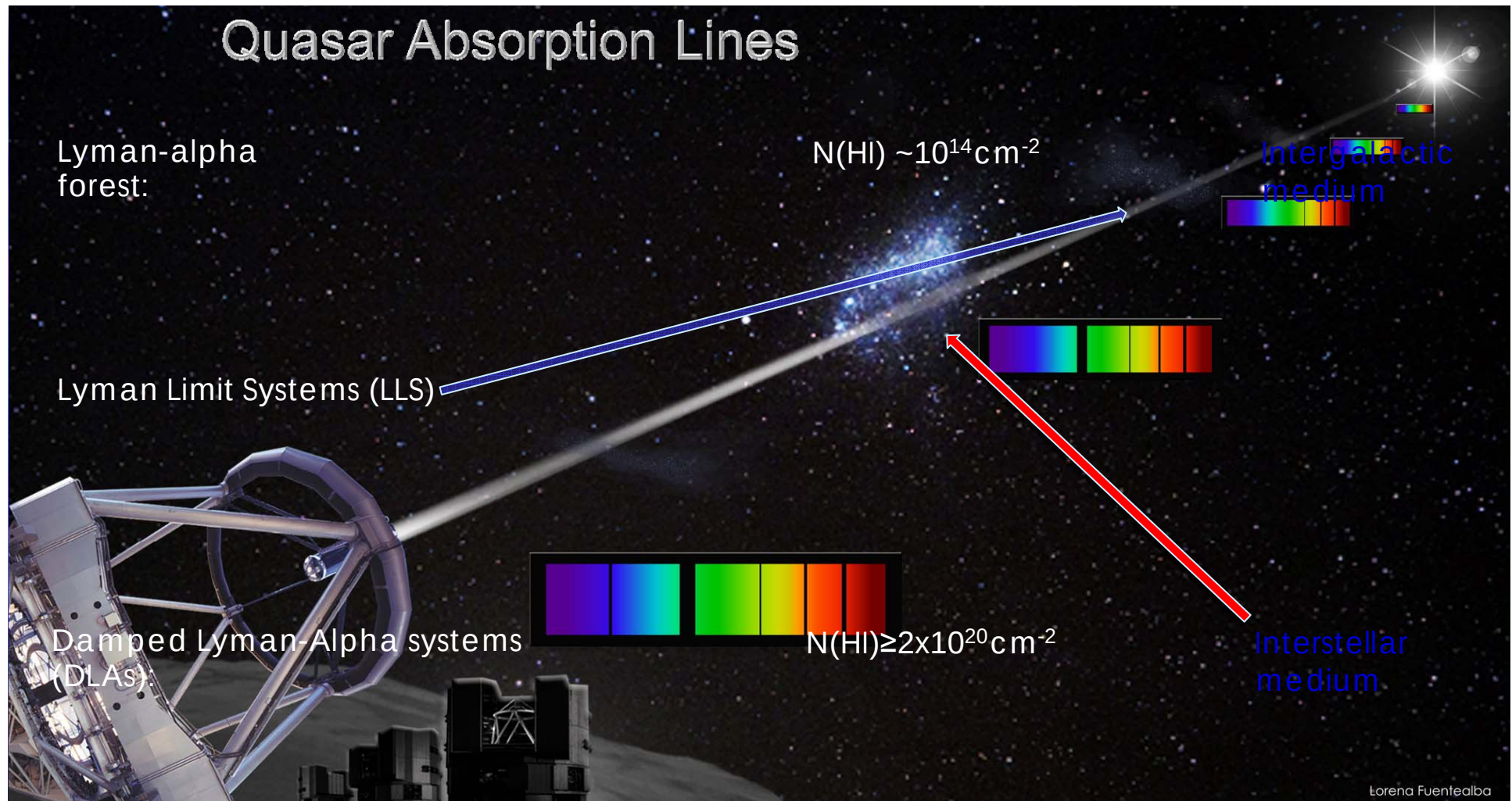
$N(\text{HI}) \geq 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$

Interstellar
medium

Lorena Fuentealba



Quasar Absorption Lines



Quasar Absorption Lines

Lyman-alpha forest:

Lyman Limit Systems (LLS)

Damped Lyman-Alpha systems (DLAs)

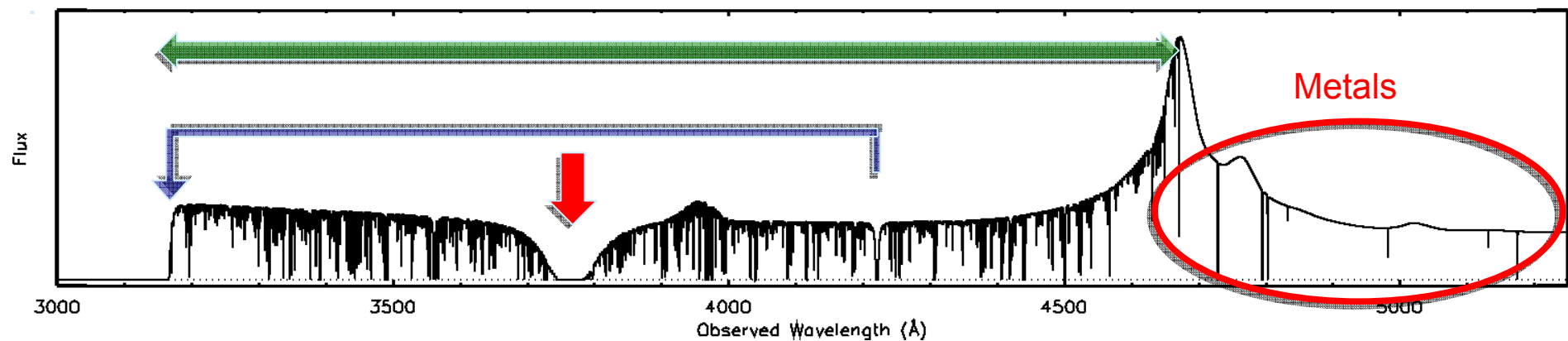
$N(\text{HI}) \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

Intergalactic medium

$N(\text{HI}) \geq 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$

Interstellar medium

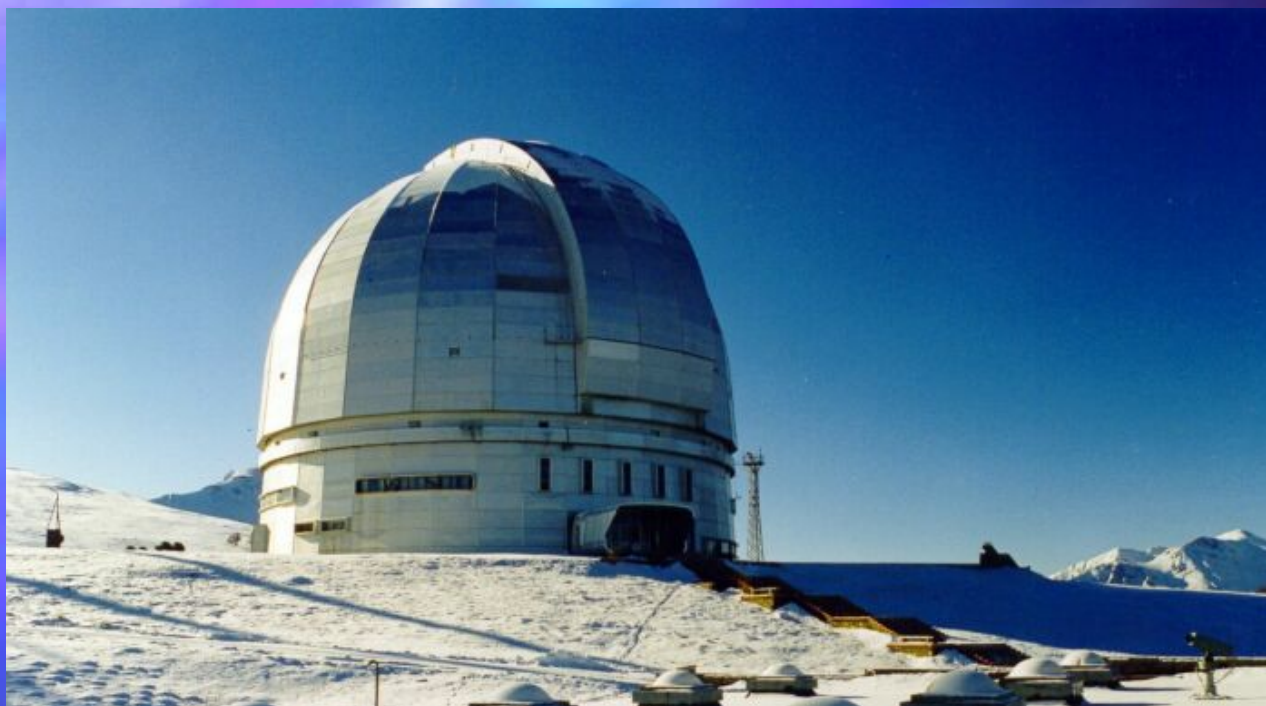
Lorena Fuentealba



Возможность экспериментальной проверки космологической вариации μ впервые появилась только после открытия облаков молекулярного водорода H_2 при больших красных смещениях (1985).

Сегодня идентифицировано более 100 000 квазаров и только в 14 из них обнаружены абсорбционные системы H_2 . Для детектирования таких систем необходимы спектрографы высокого разрешения на больших телескопах (таких как 10m Keck или 8m VLT)

И только 2(+1) из 14 имеют H_2 абсорбционные системы, пригодные для исследования проблемы переменности отношения масс протона и электрона (более 40 линий в каждой из систем, при этом профили линий имеют простую для анализа гауссову форму, ...)



й проверки
первые появилась
молекулярного
щениях (1985).

0 000 квазаров и
ционные системы
тем необходимы
я на больших
VLT)

И только 2(+1) из 14 имеют H_2 абсорбционные системы, пригодные для исследования проблемы переменности отношения масс протона и электрона (более 40 линий в каждой из систем, при этом профили линий имеют простую для анализа гауссову форму, ...)



И только 2(системы, при переменности (более 40 ли профили линии имеют простую для анализа гауссову форму, ...)



й проверки
первые появилась
ярного
(85).

аров и
системы
одимы
ольших

монные
проблемы
электрона
и этом

й проверки
первые появилась
ярного
(85).

доров и



И только 2(системы, при
переменности
(более 40 ли
профили линии имеют
форму, ...)



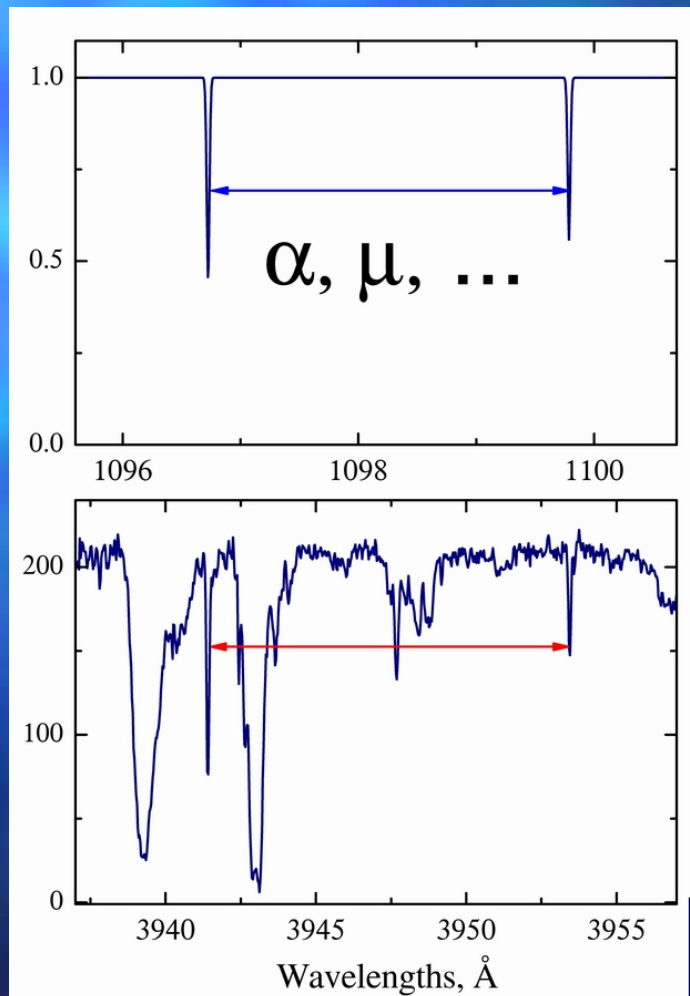
VLT at Paranal

Астрофизические методы определения вариаций фундаментальных физических констант основаны на сравнении длин волн, измеренных в спектре квазара, с длинами волн, измеренных в лаборатории.

"Здесь"
и
"Сейчас"

"Там"
и
"12 Gyr ago"

Причинно-
несвязанные,
пространственно-
различные



$$\lambda_{obs} = \lambda_{lab} (1 + z)$$

Т.о., для решения проблемы
возможной космологической
вариации $\mu = m_p/m_e$
нам необходимы:

1. Измеренные длины волн H_2 ,
сформированные в ранние эпохи эволюции
Вселенной;
2. Лабораторные длины волн этих линий;
3. Функция, определяющая зависимость
изменения длин волн $\lambda(\alpha, \mu, \dots)$ от
фундаментальных констант.

1. New astronomical observations of H₂ lines

/ A. Ivanchik, P. Petitjean, D. Varshalovich, B. Aracil,
R. Srianand, H. Chand, C. Ledoux, and P. Boissé

Astronomy & Astrophysics 404, 2005 /

2. New laboratory measurements of H₂ lines

/ E. Reinhold, R. Buning, U. Hollenstein,
A. Ivanchik, P. Petitjean, and W. Ubachs

PRL 96, 2006 /

3. New calculations of Sensitivity Coefficients

/ V. Meshkov, A. Stolyarov,
A. Ivanchik, and D. Varshalovich

JETP Letters 83, 2006 /

1.

Получены уникальные спектры высокого разрешения

($S/N \sim 40$, $R \sim 53\,000$)

для двух квазаров

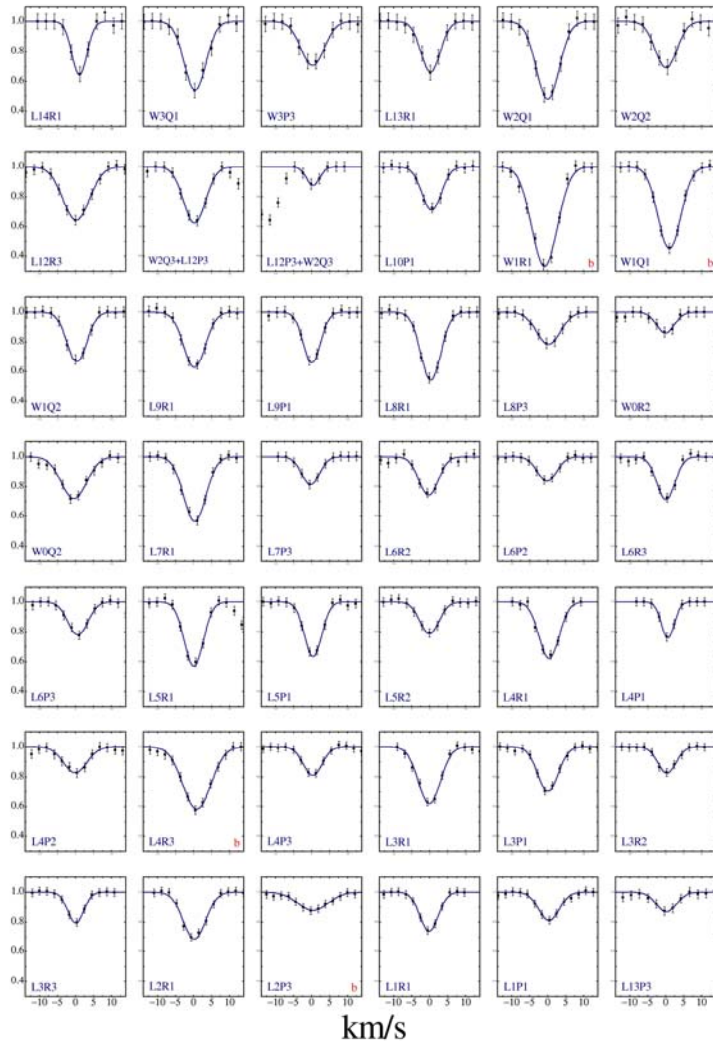
(Q 0347-383 $z_{em}=3.22$ и Q 0405-443 $z_{em}=3.02$)
(8m-VLT/UVES, ESO)

В каждом из спектров имеется

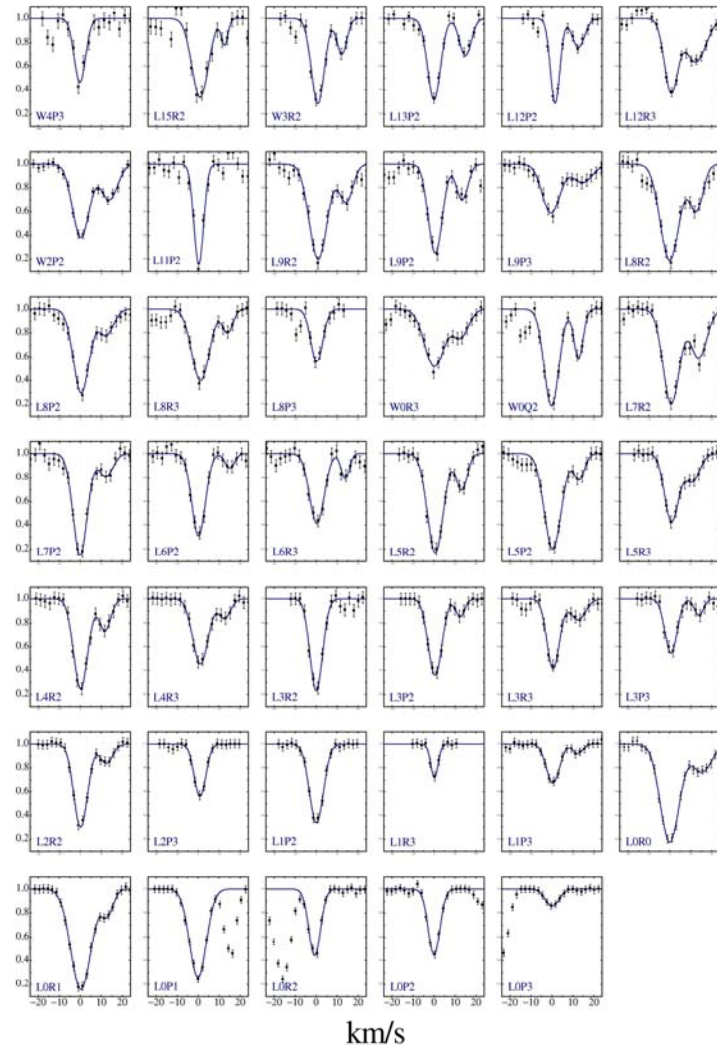
H_2 абсорбционная система

$z_{abs} = 3.0249$ и 2.5947

Q 0347-383



Q 0405-443



2.

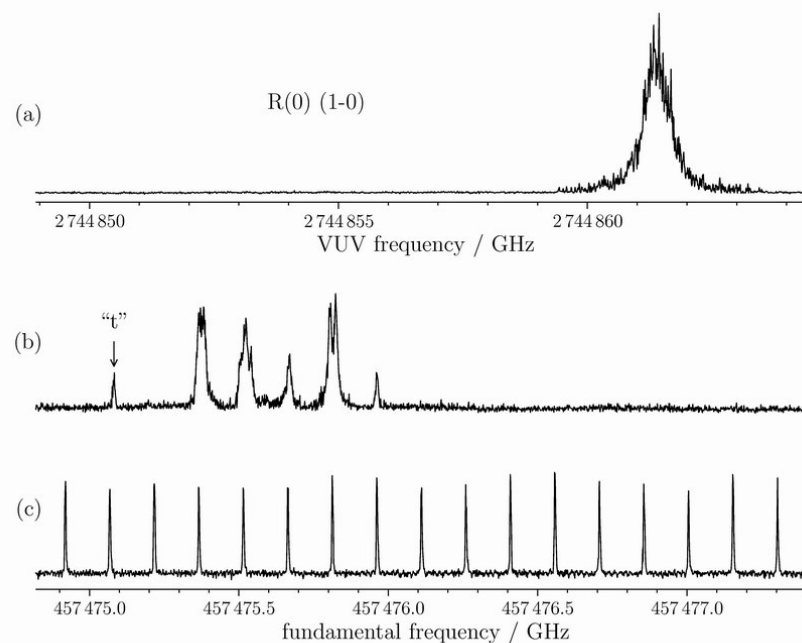
Специально для линий H_2 , наблюдаемых в двух указанных спектрах квазаров, были выполнены прецизионные измерения длин волн методом ультрафиолетовой лазерной спектроскопии.
(performed in Amsterdam)

J. Philip et al., Can. J. Chem., **82**, 713, 2004

E. Reinhold et al., PRL, **96**, 151101, 2006

Погрешность
измерения длин
волн

$\sigma_\lambda \sim 0.07 \text{ mÅ}$
в 20 раз меньше
предыдущих
измерений



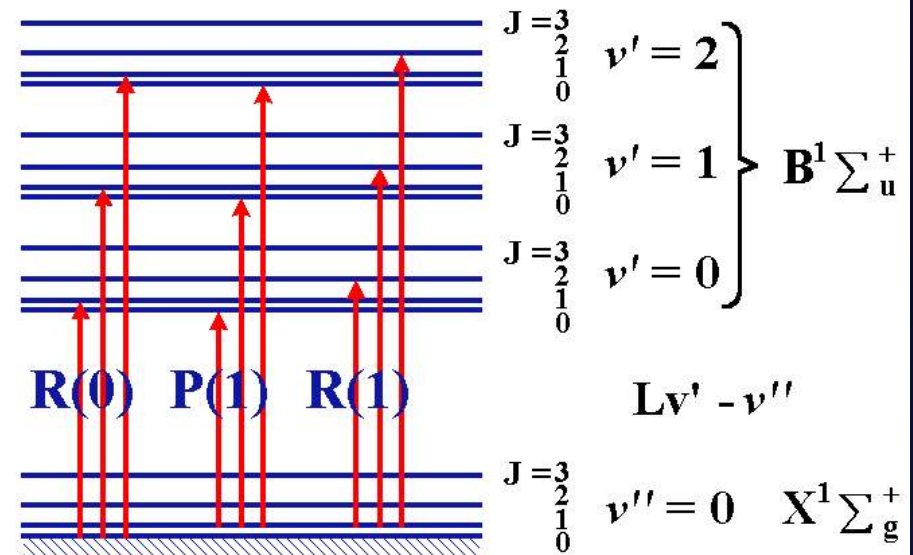
**3. Как меняются
длины волн,
если
меняется μ ?**

$$K_i = \frac{\mu}{\lambda_i} \frac{d\lambda_i}{d\mu}$$

$$E(v, J) = \sum_{k,l} Y_{kl} \left(v + \frac{1}{2} \right)^k [J(J+1) - \Lambda^2]^l$$

$$Y_{kl} \propto \mu^{-l-k/2}$$

Sensitivity Coefficients



$$E_{\text{vib}} \sim \sqrt{m_e / m_p}, \quad E_{\text{rot}} \sim (m_e / m_p).$$

Wavelengths of electron-vibro-rotational lines depend on the reduced mass of the molecule. The dependence differs for different transitions. Thus, a measured wavelength λ_i of a line formed in an absorption system at redshift z_{abs} can be written as

$$\lambda_i = \lambda_i^0 \cdot (1 + K_i \cdot \Delta\mu / \mu) \cdot (1 + z_{\text{abs}})$$

where K_i is defined as

$$K_i = \frac{\mu}{\lambda_i} \frac{d\lambda_i}{d\mu}$$

3.

Ab initio из первых принципов выполнены расчеты (с учетом неадиабатических поправок) длин волн λ_i индивидуальных линий Лаймановской и Вернеровской серий H_2 и соответствующих им коэффициентов чувствительности K_i (с точностью лучше 1%).

V. Meshkov, A. Stolyarov, A. Ivanchik, and D. Varshalovich

JETP Letters 83, 2006

Transition	λ_i (H ₂)	λ_i (D ₂)	λ_i (T ₂)	K _i
L0-0 R(1)	1108.633	1103.351	1101.021	-0.00719
L1-0 R(0)	1092.194	1091.765	1091.565	-0.00055
L2-0 R(0)	1077.137	1080.882	1082.584	+0.00508
L3-0 P(1)	1064.605	1071.312	1074.498	+0.00865

Т.о., выполнены все три условия:

$$\lambda_i^{obs}, \lambda_i^{lab}, K_i$$

$$\frac{\lambda_i^{obs}}{\lambda_i^{lab}} = (1 + z_{abs}) \left(1 + K_i \frac{\Delta\mu}{\mu} \right)$$

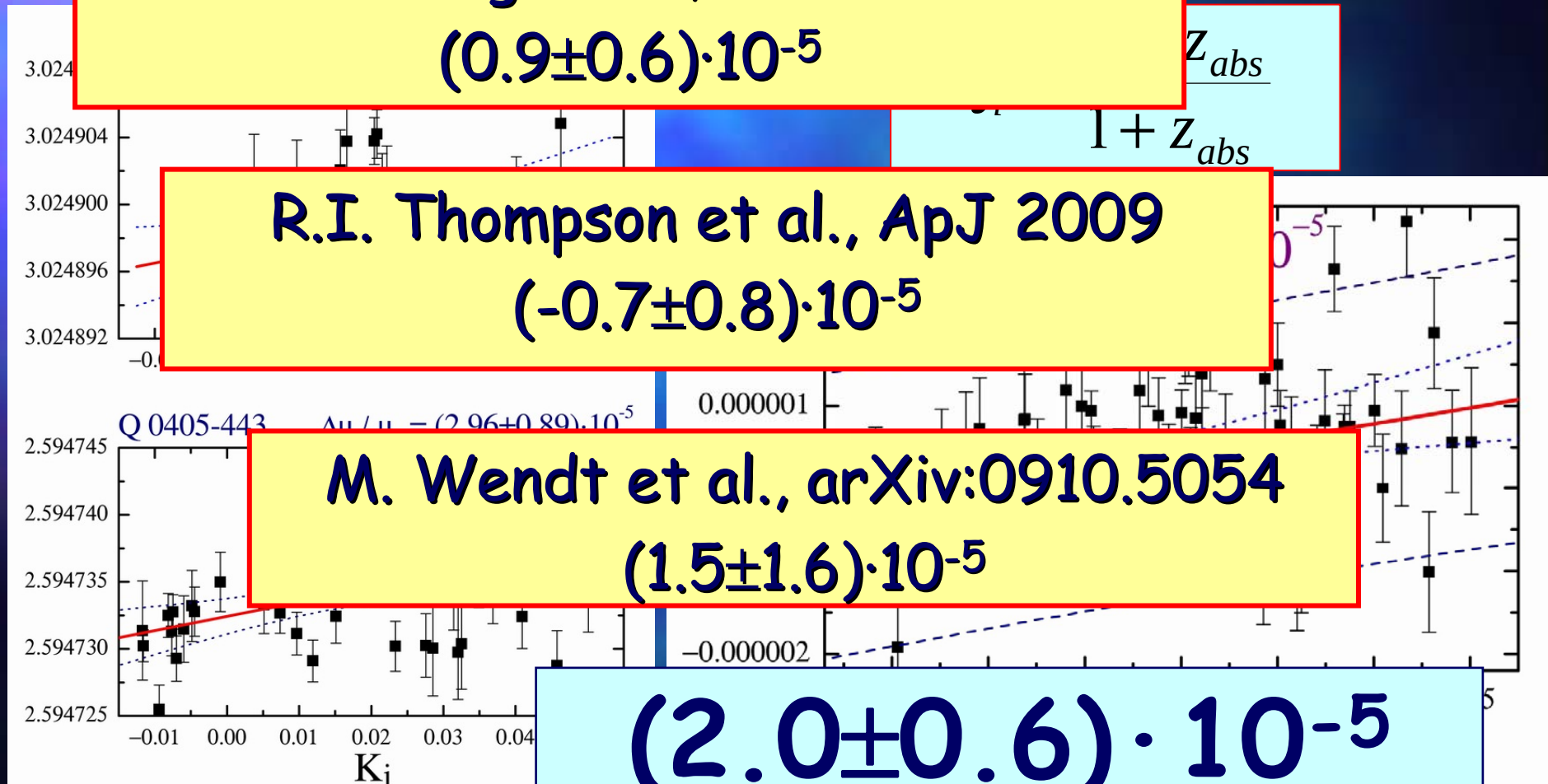
Результаты регрессионного анализа

J.A. King et al., PRL 2008
 $(0.9 \pm 0.6) \cdot 10^{-5}$

R.I. Thompson et al., ApJ 2009
 $(-0.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-5}$

M. Wendt et al., arXiv:0910.5054
 $(1.5 \pm 1.6) \cdot 10^{-5}$

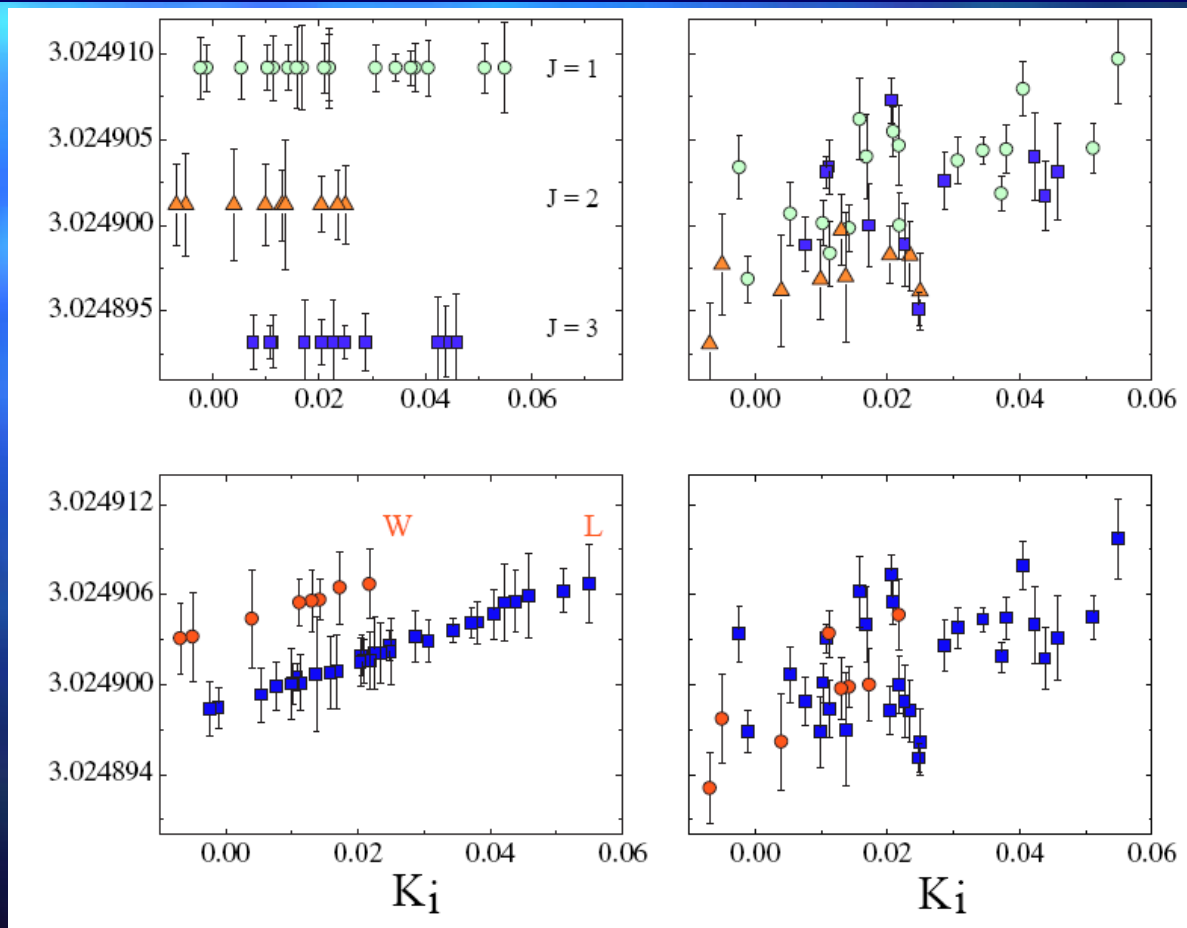
$(2.0 \pm 0.6) \cdot 10^{-5}$



Основной вопрос:
действительно ли это вариация
 μ
или
неизвестный систематический
эффект
?

Возможные систематические эффекты

Любые эффекты, способные сдвинуть центр линии монотонно с длиной волны (air-vacuum wavelength conversion, Th-Ar calibration, atmospheric dispersion effect etc.)



Выводы

- Нами обнаружена корреляция между z_i и K_i , которая могла бы быть интерпретирована как вариация μ за 12 млрд. лет.

$$\Delta\mu / \mu = (1.96 \pm 0.58) \times 10^{-5}, \quad 3\sigma$$

- ! Однако на данный момент мы не можем однозначно определить, является ли полученный эффект вариацией μ или речь идет об неизвестном систематическом эффекте.
- Т.о., полученная величина может рассматриваться как наиболее жесткий предел возможного космологического изменения μ (at $z=3$, $t=12$ Gyr)

Перспективы ...

Уменьшение дисперсии по меньшей мере в два раза позволит отличить возможный систематический эффект от реальной вариации отношения масс протона и электрона.

В настоящее время имеются несколько новых квазаров с абсорбционными системами H_2 , удовлетворяющими необходимым требованиям,

Развиваются новые методики

Развитие спектрометров высокого разрешения и создание телескопов следующего поколения позволит существенно продвинуться в исследованиях данной проблемы ...

Прецизионная КОСМОЛОГИЯ

LSS & QM
Фон гравволн

ESA Mission Planck - Launch In

2009



Large
Hadron
Collider

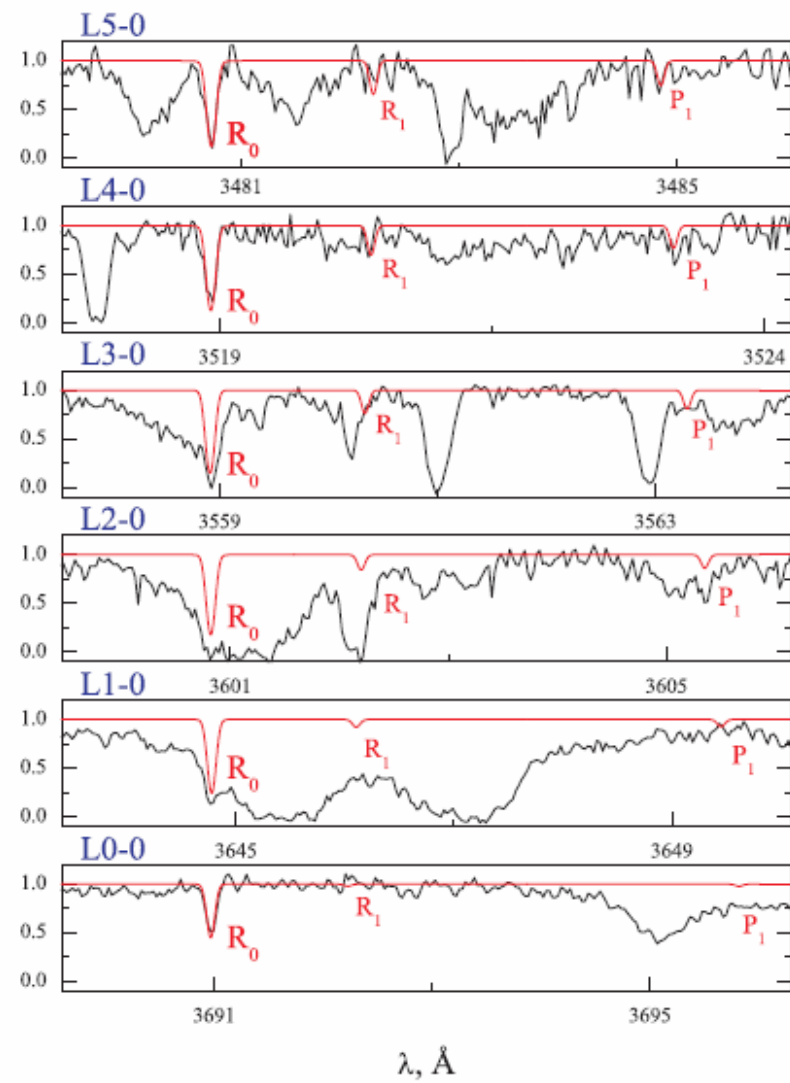
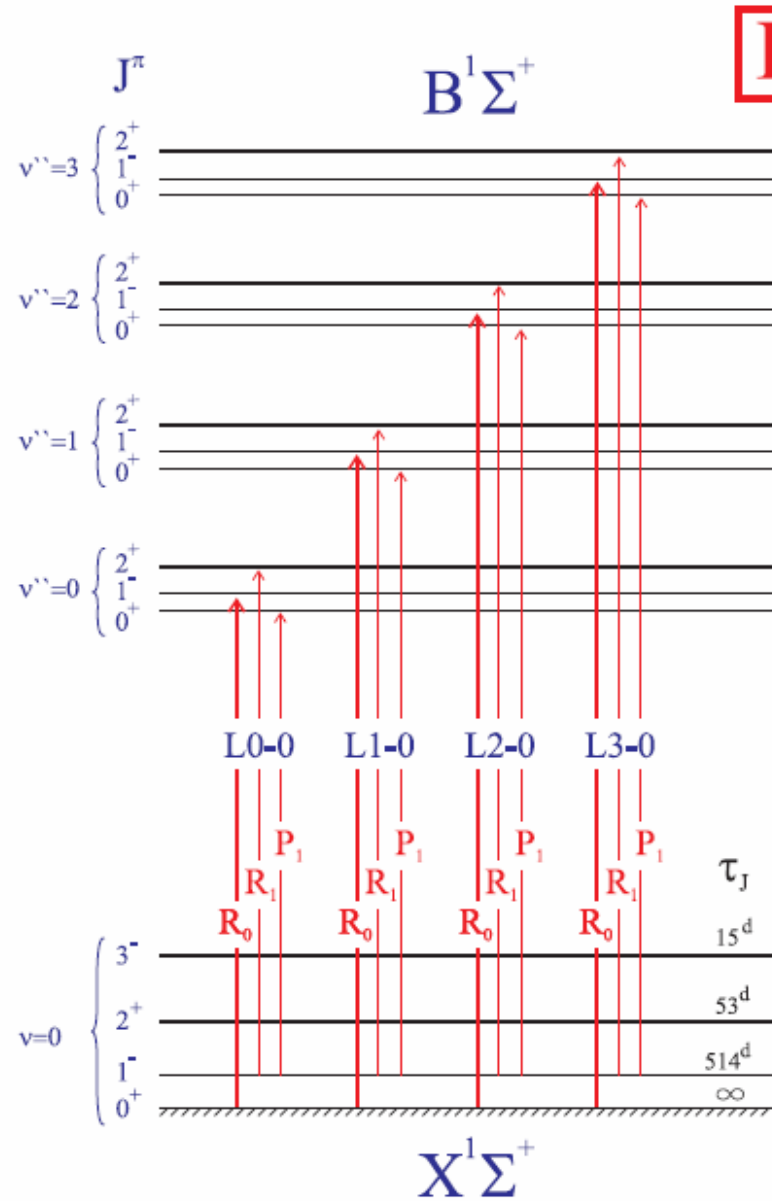
Большой
Адронный
Коллайдер

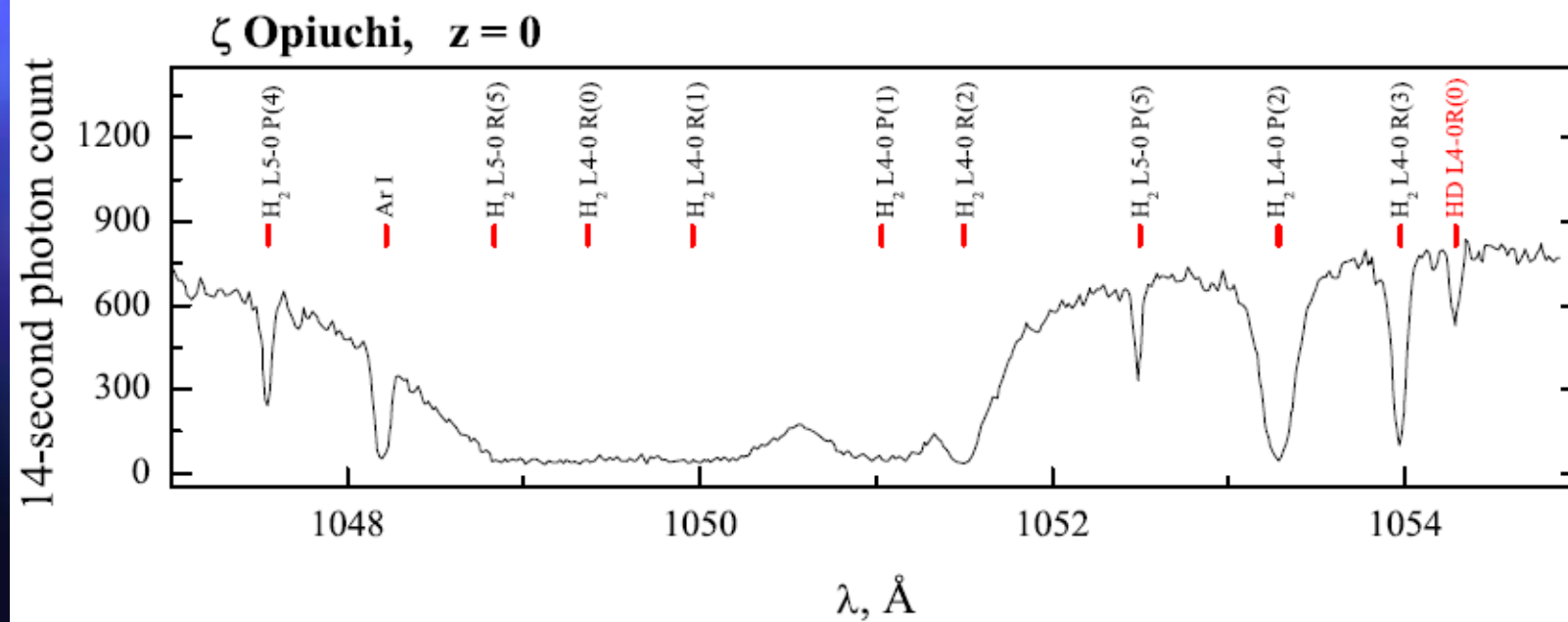
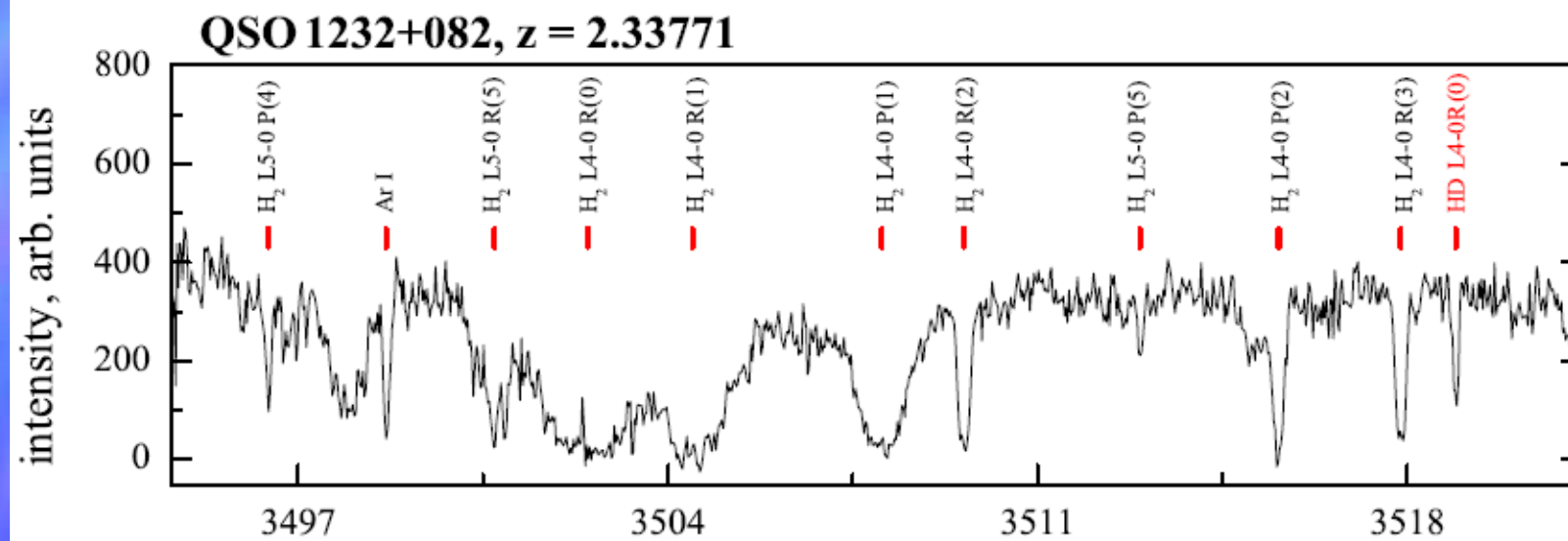
Фундаментальные
поля и частицы

Скалярные поля,
Суперсимметрия

Thanks a lot
for your attention

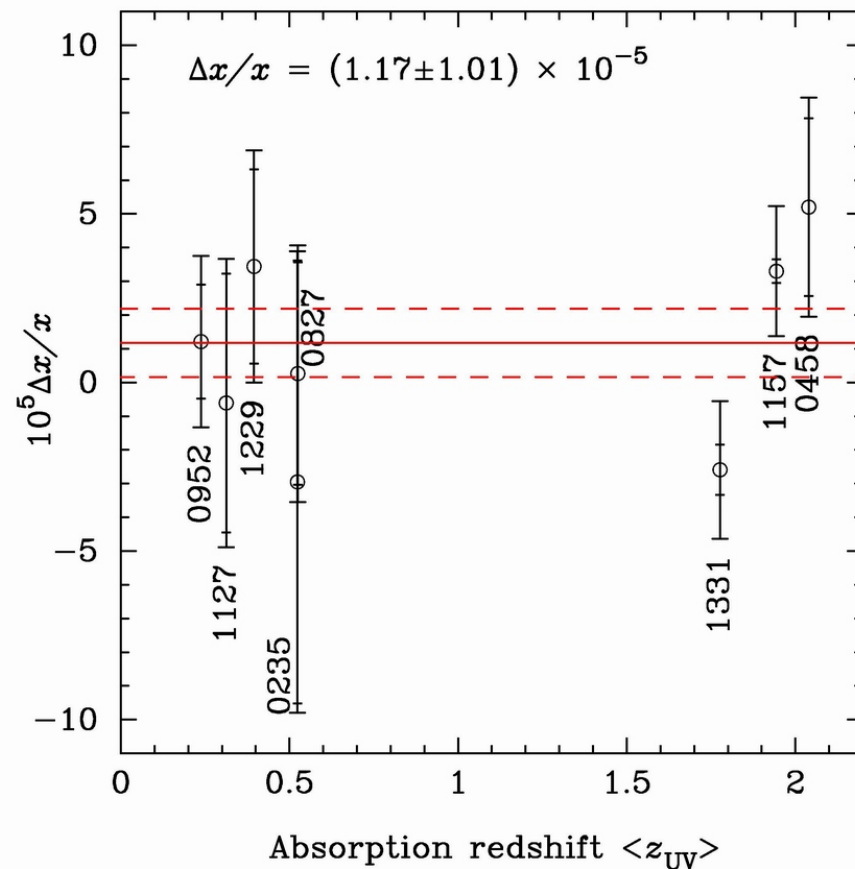






Limit on μ -variation from 21-cm and ultraviolet quasar absorptions lines (Mg I, Fe II, Zn II, etc.)

$$\Delta\mu/\mu = (-1.29 \pm 1.01) \times 10^{-5} \quad \text{for } 0.24 < z < 2.04$$



$$0.24 < z < 0.52$$

$$\Delta\mu/\mu = (-0.30 \pm 1.04) \times 10^{-5}$$

$$1.78 < z < 2.04$$

$$\Delta\mu/\mu = (-2.09 \pm 2.34) \times 10^{-5}$$

Q 0515 -441	1.15	HST
Q 1331+170	1.78	HST
Q 0551 -336	1.96	VLT
Q 0013 -004	1.97	MMT, VLT
Q 1444+014	2.09	VLT
Q 1232+082	2.34	VLT
Q 2343+125	2.43	VLT
Q 2348 -011	2.44	VLT
Q 0405 -443	2.59	VLT
Q 0528 -250	2.81	AAT, Keck, VLT
Q 0347 -383	3.02	VLT
Q 1443+272	4.22	VLT