



# Первичный дейтерий: новые оценки распространенности

Кислицын П.А.<sup>1</sup> Балашев С.А.<sup>1</sup> Иванчик А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Поддержано РФФ, грант N°23-12-00166



## Аннотация

Распространённость первичного дейтерия служит уникальным индикатором, позволяющим оценивать барионную плотность Вселенной, а также тестировать различные теории за рамками стандартной космологической модели. Каждое измерение  $D/H$  требует аккуратного наблюдения процесса и длительной обработки, поэтому на сегодняшний день в литературе представлены оценки лишь в **17** системах. В работе представлены результаты первого этапа масштабной работы по систематическому изучению баз данных спектров квазаров, согласно которым было отобрано 47 новых систем-кандидатов для оценки  $D/H$ .

## Первичный нуклеосинтез

В ходе первичного нуклеосинтеза образуются первые ядра химических элементов во Вселенной. При этом вся теория стандартного первичного нуклеосинтеза имеет единственный свободный параметр — барионную плотность Вселенной — который всё определяет.

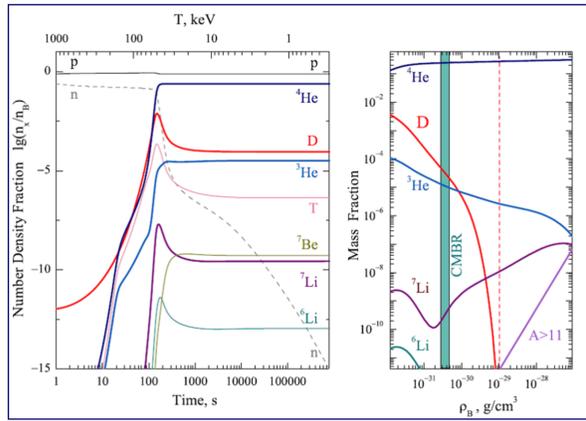


Рис. 1. Первичный нуклеосинтез. На левой панели показаны временные эволюции распространённостей различных элементов. Справа показаны конечные распространённости после первичного нуклеосинтеза в зависимости от барионной плотности Вселенной.

## Метод оценки распространенности первичного дейтерия

Наиболее надёжным способом оценки распространенности первичного дейтерия на сегодняшний день считается спектроскопический анализ квазаров, свет от которых проходил через низкометаллические облака нейтрального водорода [1].

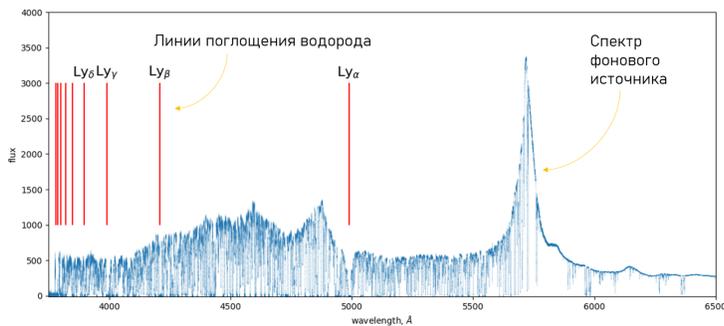


Рис. 2. Спектр квазара с абсорбционной системой, в которой была проведена оценка  $D/H$ .

Для выполнения оценки  $D/H$  необходимо измерить лучевую концентрацию водорода, что лучше всего возможно сделать при фитировании линии Лайман- $\alpha$ :

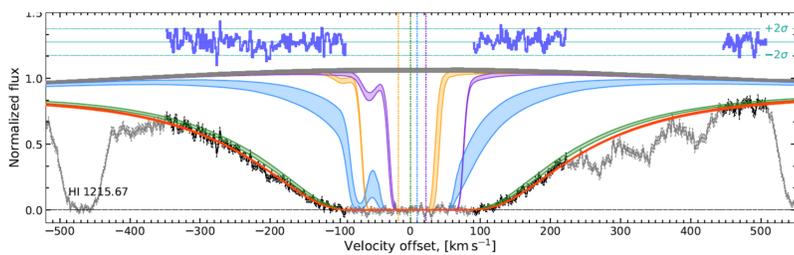


Рис. 3. Фитирование линии Лайман- $\alpha$ . Черным и серым цветами показан наблюдаемый спектр. Красным и другими цветами показаны суммарный спектр абсорбционной системы и спектры отдельных компонент. В верхней части показана невязка.

Для оценки концентрации дейтерия применяется фитирование линий дейтерия:

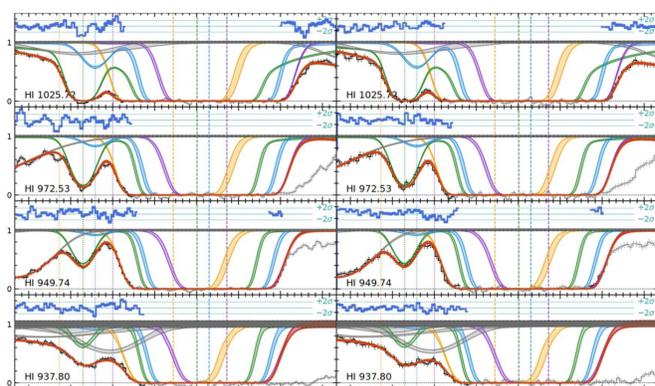


Рис. 4. Фитирование линий  $DI$  и  $HI$ . Черным и серым цветами показан наблюдаемый спектр. Красным и другими цветами показаны суммарный спектр абсорбционной системы и спектры отдельных компонент. В верхней части показана невязка. Левее основных линий поглощения видны более слабые — это и есть линии поглощения дейтерия.

Для фиксации кинетической структуры облака и снятия вырождения в моделировании также учитываются линии металлов:

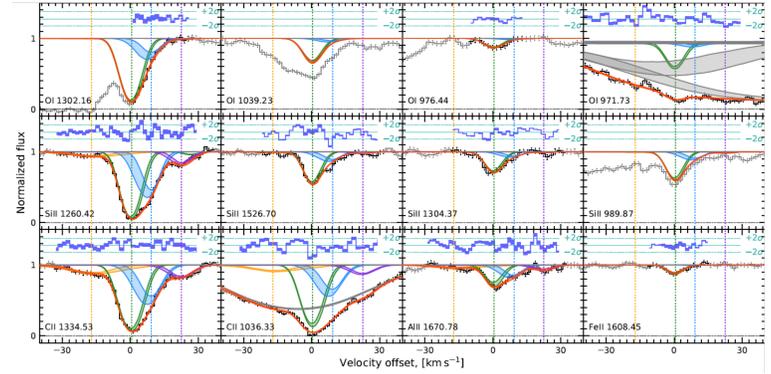


Рис. 5. Фитирование линий металлов. Обозначения соответствуют рисункам 3 и 4.

Для наиболее достоверных оценок параметров модели обычно используется метод MCMC.

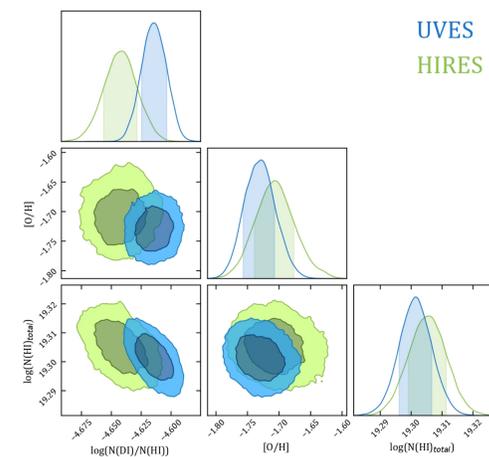


Рис. 6. Апостериорные распределения параметров при фитировании спектра методом Монте-Карло (MCMC).

## Систематический поиск новых систем для оценки $D/H$

Для поиска новых систем для оценки  $D/H$  были проанализированы каталоги спектров квазаров высокого разрешения. Снятые на лучших телескопах: VLT и KECK, эти каталоги SQUAD[2] и KODIAQ[3] содержат 767 спектров, которые были индивидуально исследованы.



Рис. 7. Передовые телескопы человечества: VLT и KECK.

## Результаты

Было найдено 47 новых систем, в которых в настоящий момент производится спектроскопический анализ и оценка  $D/H$ . Особенную ценность полученный набор представляет и потому, что согласно предварительным оценкам (Рис.8), новые системы существенно расширяют диапазон физических условий в исследуемых системах, что позволит более надежно и обоснованно судить о систематических ошибках оценки распространенности первичного дейтерия.

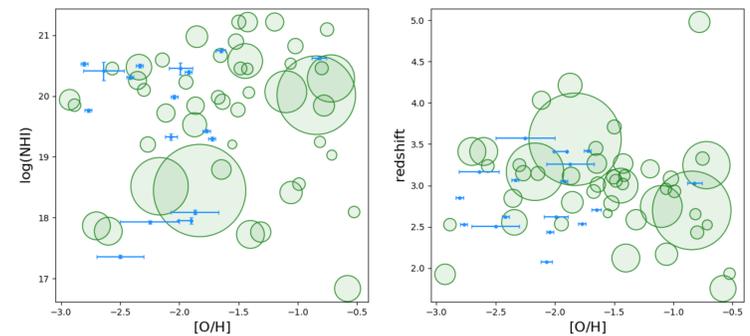


Рис. 8. Сравнение оценок физических параметров систем  $D/H$  из литературы и новых систем. Синим обозначены оценки из литературы, зелеными кругами — новые оценки.

## References

- [1] P A Kislitsyn, S A Balashev, M T Murphy, C Ledoux, P Noterdaeme, and A V Ivanchik. A new precise determination of the primordial abundance of deuterium: measurement in the metal-poor sub-dla system at  $z = 3.42$  towards quasar j1332+0052. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 528(3):4068–4081, 01 2024.
- [2] Michael T Murphy, Glenn G Kacprzak, Giulia A D Savorgnan, and Robert F Carswell. The uves spectral quasar absorption database (squad) data release 1: the first 10 million seconds. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482(3):3458–3479, 10 2018.
- [3] J. M. O'Meara, N. Lehner, J. C. Howk, J. X. Prochaska, A. J. Fox, M. S. Peebles, J. Tumlinson, and B. W. O'Shea. The second data release of the kodiaq survey. *The Astronomical Journal*, 154(3):114, aug 2017.