

Daniele Galli, Francesco Palla

# L'alba dell'evoluzione chimica dell'Universo

*The dawn of the chemical evolution of the Universe*

INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri

**Sommario.** Un articolo di rassegna recentemente pubblicato fa il punto sull'origine delle prime molecole, formate nell'Universo successivamente all'epoca della ricombinazione avvenuta circa 400,000 anni dopo il Big Bang. Queste molecole primitive svolsero il ruolo di agenti di raffreddamento del gas primordiale, permettendo la formazione delle prime stelle, che, a loro volta, generarono gli elementi pesanti alla base della vita sulla Terra.

**Parole Chiave.** Universo primordiale, chimica primordiale, processi atomici e molecolari, cosmologia

Come siamo arrivati all'Universo chimicamente ricco e complesso in cui viviamo a partire dalla semplice mistura di idrogeno ed elio prodotti nei primi tre minuti dopo il Big Bang? Come e quando sono apparse le prime molecole nell'ambiente avverso dell'Universo in rapida espansione? Lo studio della chimica primordiale cerca di dare una risposta accurata a queste domande. Negli ultimi decenni sono stati sviluppati modelli chimici e dinamici di complessità via via crescente allo scopo di seguire l'evoluzione della componente barionica dell'Universo fino all'epoca della formazione delle prime strutture (stelle e/o galassie) che si ritiene sia

**Abstract.** A recently published review paper summarizes our current understanding of the origin of the simplest chemical species in the Universe, synthesized soon after the epoch of recombination about 400,000 years after the Big Bang. These primitive molecules constituted the cooling agents that allowed the primordial gas to form the first stars, in turn producing the heavy elements on which our life is based.

**Keywords.** Early Universe, primordial chemistry, atomic and molecular processes, cosmology

How did the simple mixture of hydrogen and helium produced in the first three minutes after the Big Bang evolve into the chemically rich and complex universe we live in today? When and how did the first molecules appear in the hostile environment of the rapidly evolving and expanding Universe? The study of primordial chemistry aims at answering precisely these questions. Over the last forty years, chemical models of increasing complexity have been devel-



avvenuta circa 500 milioni di anni dopo il Big Bang. Sono state le prime stelle a sintetizzare gli elementi più complessi dell'idrogeno e dell'elio, quali il carbonio, l'azoto, l'ossigeno e il ferro, di cui è composto il mondo in cui viviamo.

L'aspetto più interessante è che nulla sarebbe potuto accadere dal punto di vista chimico se l'Universo espandendosi e raffreddandosi fosse passato da un plasma completamente ionizzato ad un gas di puro idrogeno ed elio atomico. Tuttavia, durante la fase critica di "ricombinazione" dell'idrogeno, avvenuta 400,000 anni dopo il Big Bang, un piccolo ma non trascurabile residuo di elettroni liberi agì da catalizzatore di una serie di reazioni in fase gassosa che produssero molecole neutre, quali l'idrogeno molecolare e il suo isotopologo deuterato (le due specie chimiche più semplici), e ioni molecolari contenenti elio, deuterio e litio.

Questa storia è l'argomento di un articolo di rassegna pubblicato nel volume di *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* del 2013 con autori Daniele Galli e Francesco Palla, astronomi dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri dell'INAF. La necessità di fare il punto sull'evoluzione chimica dell'Universo durante le cosiddette "Dark Ages" è motivata in parte dal fatto che la cosmologia moderna è entrata nell'era delle misure di alta precisione grazie alle missioni BOOMERANG, WMAP, Planck e HST. Ciò ha permesso di definire il modello cosmologico di riferimento con un'accuratezza senza precedenti, lasciando alla sola evoluzione chimica le incognite residue, sia sperimentali che teoriche.

La Fig. 1 qui mostrata permette di apprezzare visivamente le varie fasi dell'evoluzione del gas primordiale al passare del tempo, o equivalentemente al diminuire del *redshift* dall'epoca della ricombinazione ( $z=2000$ ) fino a quella della formazio-

oped to trace the changing composition of the baryonic component of the Universe in the half billion years that preceded the formation of the first stars that generated the heavy elements of which we are made. Nothing could have happened if the universe had not gone through the epoch in which ionized hydrogen recombined to form neutral hydrogen, leaving behind a tiny but crucial fraction of free electrons during the so-called "recombination epoch", four hundred thousand years after the Big Bang. These electrons acted as catalysts for the occurrence of gas-phase reactions, mainly producing neutral molecules (molecular hydrogen, the simplest molecule containing the most abundant element in the universe, and its deuterated isotopologue), and various anions and cations from helium and the trace elements deuterium and lithium.

This story is the subject of a review paper (Galli & Palla 2013). The need to review the chemical evolution of the Universe stems from the realization that cosmology has fully entered the era of high precision, thanks to a suite of telescopes such as HST, BOOMERANG, WMAP, and Planck. Today, the reference cosmological model is known with unprecedented accuracy, leaving to chemistry the remaining uncertainties, both experimental and theoretical.

The various phases that marked the production of the most interesting species as a function of *redshift* are shown in Fig. 1 starting from the recombination era ( $z=2000$ ) up to the epoch of the first structure formation ( $z=10$ ). These simple molecules played a fundamental role in allowing the primordial gas to cool and fragment within the dark matter dominated halos, thus producing the first objects that lit up the dark ages. The nature of these first stars, or even massive black holes, is still controversial, but the action of the molecular species thus formed

ne delle prime strutture ( $z=10$ ). La molecola più abbondante è  $H_2$  seguita da HD. Queste molecole hanno avuto un ruolo fondamentale nel permettere il raffreddamento e la frammentazione del gas primordiale all'interno degli aloni di materia oscura da cui hanno avuto origine i primi oggetti che hanno illuminato le "Dark Ages". La natura delle prime stelle e/o buchi neri massicci è ancora incerta, ma il ruolo delle molecole primordiali non può assolutamente essere trascurato. Altrettanto importante è l'interazione delle molecole con la Radiazione Cosmica di Fondo che ha lasciato impronte spettroscopiche rivelabili con i telescopi moderni. Per conoscere le frequenze di queste transizioni molecolari sono spesso necessari esperimenti dedicati di spettroscopia ad alta risoluzione. Per esempio, la misura più accurata delle frequenze roto-vibrazionali dell'idruro di litio (LiH) è stata realizzata in collaborazione con il Laboratorio Europeo di Spettroscopia Non-Lineare (LENS) all'epoca sulla collina di Arcetri.

### Bibliografia

D. Galli e F. Palla (2013), *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 51

*Daniele Galli* è nato e ha studiato a Pisa; Francesco Palla è nato a Roma dove ha compiuto gli studi universitari. Entrambi sono astronomi all'Osservatorio Astrofisico di Arcetri dove si occupano di formazione stellare e materia interstellare. Sono anche attivi nella divulgazione e nella didattica dell'astronomia. D. Galli si interessa alla storia dell'Osservatorio.

cannot be neglected. Of equal importance is the interaction of the primordial molecules with the photons of the cosmic microwave background that left specific signatures in its spectrum. For some species these calculations require ad-hoc experiments to determine the accurate frequencies of the relevant molecular transitions. For example, the most accurate frequencies for the ro-vibrational transitions of lithium hydrides were obtained in a joint effort at the European Laboratory for Non-Linear Spectroscopy, which was on the Arcetri hill at the time.

### Bibliography

D. Galli e F. Palla (2013), *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 51

*Daniele Galli* received his degree in Physics from the University of Pisa. Francesco Palla was born in Roma and studied at the University of Rome. They are both astronomers of the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory, working on problems of star formation and interstellar medium. They are also actively involved in outreach activities. D. Galli is interested in the history of the Observatory.

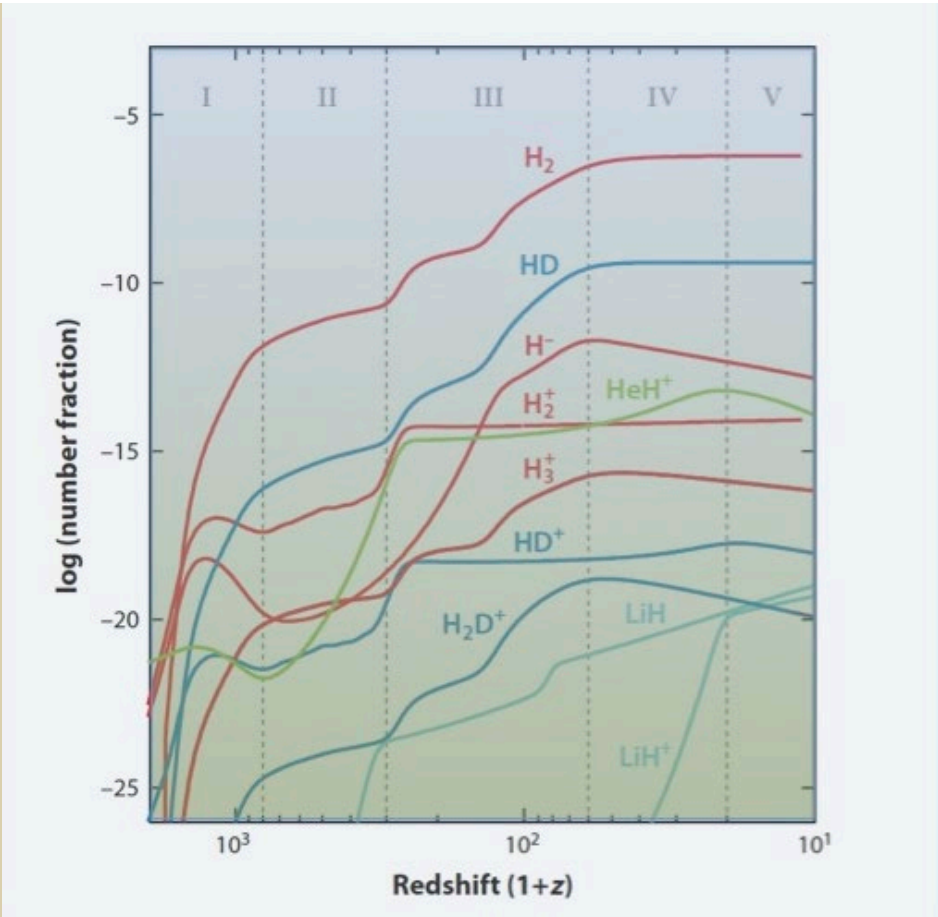


Fig. 1. La variazione con il *redshift* delle abbondanze frazionarie (relative al numero totale di barioni) delle principali molecole e ioni formati nell'Universo primordiale. Le linee tratteggiate verticali indicano gli intervalli delle cinque principali fasi evolutive che hanno caratterizzato l'evoluzione chimica dell'Universo

Fig 1. Fractional abundances (relative to the total number of baryons) of the main molecules and ions formed in the early Universe as function of *redshift*. The vertical dotted lines indicate the boundaries of the five main evolutionary phases that characterize the beginning of the chemical evolution of the Universe.