



Il Colle di
Galileo

Francesco Fontani¹, Victor M. Rivilla¹, Chiara Mininni^{1,2}

La caccia al fosforo interstellare, l'elemento pre-biotico dimenticato

The hunt for interstellar phosphorus, the forgotten pre-biotic element

¹INAF--Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, Firenze

²Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze, Firenze

Riassunto. Il fosforo è un elemento cruciale per lo sviluppo della vita come la conosciamo, ma a causa della sua bassa abbondanza cosmica, fino a pochi anni fa la sua chimica interstellare era quasi del tutto sconosciuta. Dal 2016, il gruppo di Formazione Stellare di Arcetri ha contribuito in modo fondamentale alla comprensione di alcuni processi astrochimici che coinvolgono questo elemento in regioni della Galassia in cui si formano nuove stelle, aprendo la strada a un numero crescente di studi su questo elemento pre-biotico finora “dimenticato”.

Parole chiave. Formazione stellare, astrochimica, mezzo interstellare.

Insieme a idrogeno, ossigeno, carbonio ed azoto, il fosforo (P) è un elemento fondamentale per lo sviluppo della vita come noi la conosciamo. Infatti, i suoi composti svolgono un ruolo chiave nella struttura a doppia elica del DNA, nelle membrane cellulari, e nella molecola adenosin-trifosfato (ATP), con cui avviene il trasporto di energia nelle cellule [1]. Per questi motivi (e non solo), il premio Nobel per la chimica Sir Alexander Todd ha sottolineato l'importanza del fosfo-

Abstract. Phosphorus is a crucial element for the development of life as we know it, but because of its low cosmic abundance, until recently its interstellar chemistry was almost totally unknown. Since 2016, the star formation group at Arcetri has made a fundamental contribution to our understanding of the astrochemical processes that involve this element in the star-forming regions of the Galaxy, paving the way for a growing number of studies on this pre-biotic element that had been “forgotten” up to now.

Keywords. Star formation. astrochemistry. interstellar medium.

Together with hydrogen, oxygen, carbon and nitrogen, phosphorus (P) is a crucial element for the development of life as we know it. In fact, its compounds play a key role in the double-helix structure of DNA, in the phospholipids that make up cellular membranes, and in the adenosin-tiphosphate (ATP) molecule, with which the energy transfer in cells occurs [1].

ro come elemento biogenico quando ha dichiarato: "Dove c'è vita, c'è fosforo".

Sappiamo che il P è creato da reazioni nucleari all'interno di stelle di alta massa ($M > 8M_{\text{sun}}$), ed espulso durante la loro esplosione come supernovae [2]. Ma la chimica interstellare del fosforo, ovvero i processi che portano il P elementare presente nel mezzo interstellare diffuso, in molecole sempre più complesse nelle parti più dense delle nubi molecolari, è rimasta quasi sconosciuta fino a pochi anni fa. Questo è dovuto in parte alla bassa abbondanza cosmica dell'elemento ($P/H \sim 10^{-7}$, circa 2-3 ordini di grandezza inferiore rispetto alle abbondanze di carbonio, ossigeno ed azoto), che rende l'emissione delle specie chimiche contenenti il P debole, e quindi difficile da rivelare. Infatti, fino al 2015 l'unica molecola rivelata in regioni di formazione stellare era il PN, e in solo 6 sorgenti [3,4]. A causa di questa mancanza di vincoli osservativi, i modelli chimici sviluppati dopo le prime rivelazioni [3,5] che tentano di spiegare la formazione nello spazio di molecole contenenti P, anche semplici, sono rimasti senza confronto osservativo.

Dal 2016, il gruppo di Formazione Stellare di Arcetri ha intrapreso un programma osservativo rivolto a migliorare la comprensione della chimica del fosforo in regioni di formazione stellare, seguendo vari approcci: aumentare in modo significativo il numero di regioni di formazione stellare in cui il PN viene rivelato ([6]) per migliorare l'analisi statistica; rivelare nuove ed importanti molecole contenenti P ([7,8]) per confrontare osservazioni e modelli chimici in modo più completo; per una stessa sorgente, rivelare un numero cospicuo di righe di emissione della stessa molecola ([9]) con diverse condizioni di eccitazione, per ricavarne stime accurate di abbondanza. Per raggiungere i goals descritti sopra, il

For these (and other) reasons, winner of the Nobel prize for chemistry, Sir Alexander Todd, stressed the importance of phosphorus as a biogenic element when he declared: "Where there is life, there is phosphorus".

We know that P is created by nuclear reactions occurring within high-mass stars ($M > 8M_{\text{sun}}$) and is ejected during supernova explosions [2]. But the interstellar chemistry of phosphorus, meaning the processes that bring the elemental P from the diffuse interstellar medium into more and more complex molecules in the densest parts of molecular clouds, was almost totally unknown until a few years ago. This is partly due to the low cosmic abundance of the element ($P/H \sim 10^{-7}$, i.e. about 2-3 times less than carbon, oxygen and nitrogen), which makes the emission of chemical species containing P faint and so difficult to detect.

Until 2015, the only P-bearing molecule detected in star-forming regions was PN, and in only six sources [3,4]. Due to this lack of observational constraints, the chemical models developed after the first findings [3,5], which try to explain the formation in space of even the simplest P-bearing molecules, have remained without any observational comparison.

Since 2016, the Arcetri star formation group has undertaken an observational programme devoted to improve our understanding of the chemistry of phosphorus in star-forming regions, following different approaches: significantly increasing the number of star-forming regions in which PN is detected ([6]) to improve the statistical analysis; to detect new and important P-bearing molecules ([7,8]) in order to compare observations and chemical models in a more complete way; for a given source, detecting a large number of emission lines of the same mol-

gruppo ha fatto uso dei migliori strumenti disponibili che lavorano a frequenze appropriate per osservare l'emissione delle molecole, cioè in banda radio-millimetrica, quali il telescopio di 30m di diametro dell'Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM), situato sulla Sierra Nevada (Spagna), o l'interferometro Atacama Large Millimeter Array (ALMA), il migliore interferometro millimetrico esistente, operativo sulle Ande cilene.

Uno dei risultati più importanti è stato la prima rivelazione in due regioni di formazione stellare, W51 e W3(OH), della molecola PO ([7]), il legame fondamentale dei fosfati (PO_4^{3-}). Le osservazioni, ottenute con il telescopio IRAM-30m, hanno mostrato che l'abbondanza di P in queste due regioni di formazione stellare è circa dieci volte maggiore rispetto a quanto precedentemente aspettato. Un risultato che indica come il P sia un ingrediente più abbondante di quanto si pensa nello spazio per formare i mattoncini fondamentali della vita.

Un altro risultato importante ottenuto in due lavori indipendenti ([8,9]) è che il PN risulta ben correlato con alcune proprietà osservative dell'ossido di silicio, o SiO, una molecola che si forma in gas investito da onde d'urto. Infatti il silicio è un elemento refrattario che nello spazio interstellare si trova soprattutto in forma solida dentro i grani di polvere, per cui ha bisogno di un'onda d'urto che spacchi i grani per andare abbondantemente nel gas e formare SiO. Questo indicherebbe che, come per SiO, una sorgente importante di PN proviene da grani di polvere colpiti da onde d'urto.

Il nostro gruppo sta continuando la ricerca di molecole contenenti P in un numero sempre maggiore di sorgenti, inclusi oggetti minori del sistema solare.

ecule ([9]) with different excitation conditions, to obtain accurate estimates of abundance. To achieve these goals, the group has used the best observational facilities working at appropriate frequencies to observe the emission of molecules, in the radio-millimetre band, such as the 30m telescope of the Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM), located in the Sierra Nevada (Spain), or the Atacama Large Millimeter Array (ALMA), the best existing millimetre interferometer, operating on the Chilean Andes.

One of the most important results was the first detection, of the PO molecule ([7]), the basic bond of phosphates (PO_4^{3-}) in two star-forming regions, W51 and W3(OH).

Observations carried out with the IRAM-30m telescope have shown that the abundance of P in these two star-forming regions is about ten times higher than previously expected. These results indicate that phosphorus is an ingredient, available in space in greater quantities than previously thought, for forming the basic bricks of life.

Another important result achieved from two independent works ([8,9]) is that PN is closely correlated with some emission properties of silicon monoxide, or SiO, which is formed in dense gas affected by shock waves. In fact, silicon is a refractory element that is found mostly in solid form in the core of interstellar dust grains in space, so it needs a shock wave to break down the grains to go copiously into the gas and form SiO. This would indicate that, as for SiO, an important source of PN originates from the sputtering of dust grains impacted by shockwaves.

The efforts of our group are ongoing and are devoted mostly to searching for other species containing P, from a growing number of sources, including minor bodies of the solar system. It

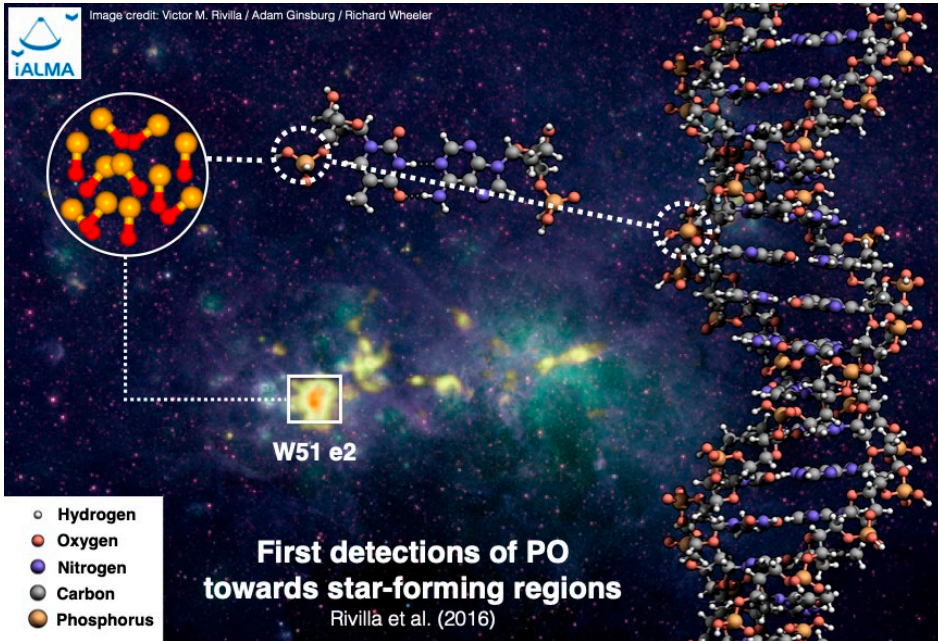


Figura 1. La figura mostra la regione di formazione stellare W51 e2, dove è stata rivelata l'emissione della molecola PO, il legame fondamentale dei fosfati. A destra: filamento di DNA, la cui doppia elica è composta anche di fosfati.

Figure 1. The star-forming region W51 e2, where emission of the PO molecule, the fundamental link of phosphates, has been detected. On the right: a DNA filament, also made up of phosphates.

will be very important to understand how the species containing P that are formed in the first stages of the star-formation process have been conserved and “inherited” from the primitive material of the solar system.

F. Fontani: staff astronomer. Interests: star formation and astrochemistry;
V.M. Rivilla: Marie Curie Postdoc. Interests: star formation and astrochemistry;
C. Mininni: PhD student. Interests: star formation and astrochemistry.

Sarà infatti di grande importanza capire come le specie contenenti P che si sono formate nelle prime fasi della formazione stellare sono state conservate ed “ereditate” dal materiale primordiale del sistema solare.

F. Fontani: astronomo di staff. Interessi: formazione stellare e astrochimica;

V.M. Rivilla: Postdoc Marie Curie. Interessi: formazione stellare e astrochimica;

C. Mininni: studente PhD. Interessi: formazione stellare e astrochimica.

Bibliografia

- [1] Pasek & Lauretta, *Astrobiology* 5, 515 (2005)
- [2] Koo et al., *Science* 342, pp 1346 (2013)
- [3] Turner & Bally, *ApJ*, 321, L75 (1987)
- [4] Turner et al., *ApJ*, 365, 569 (1990)
- [5] Charnely & Millar, *MNRAS*, 270 (1994)
- [6] Fontani et al., *ApJ* 822, L30 (2016)
- [7] Rivilla et al., *ApJ* 826, 161 (2016)
- [8] Rivilla et al., *MNRAS* 475, L30 (2018)
- [9] Mininni et al., *MNRAS*, 476, L39 (2018)