



# ¿De dónde viene el oxígeno que nos rodea?

**GLORIA DELGADO INGLADA**  
gloria.delgado.inglada@gmail.com  
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA DE LA UNAM

## **El oxígeno en la Tierra**

Cerramos los ojos e inhalamos profundamente, nuestros pulmones se llenan de oxígeno (oxígeno molecular,  $O_2$ ). Pero, ¿de dónde procede?

Cuando la Tierra se formó, hace unos 4 600 millones de años, su atmósfera estaba hecha prácticamente de hidrógeno y helio, no había oxígeno. Al no tener un campo magnético que la protegiera, el viento solar le arrebató su atmósfera primitiva. Unos 200 millones de años después, los volcanes que plagaban la Tierra empezaron a expulsar gases como vapor de agua, dióxido de carbono y amoníaco, formando una nueva atmósfera. Al incidir la radiación del Sol sobre estas moléculas, las rompió, y dio lugar a átomos de nitrógeno a partir del amoníaco (lo que provocó que la cantidad de éste en la atmósfera aumentara de manera paulatina). También se liberaron algunos átomos de oxígeno, que rápidamente se unieron a otros e hicieron que en la atmósfera no hubiera casi átomos de oxígeno libres.

Hace 2 500 millones de años aparecieron las cianobacterias, y entonces todo cambió. Estas bacterias primitivas que flotaban en los océanos fueron las primeras en hacer fotosíntesis. A través de la radiación solar, tomaban el agua y el dióxido de carbono, y rompían estas moléculas para formar oxígeno y compuestos orgánicos. En unos pocos cientos de millones de años, gracias a estas bacterias, la atmósfera de la Tierra pasó a tener la composición actual: 21 por ciento de oxígeno molecular ( $O_2$ ) y 78 por ciento de nitrógeno molecular ( $N_2$ ).

### La producción de los elementos químicos en el universo

Dejemos a un lado la Tierra y pensemos en nuestro Sol, ¿de dónde viene el oxígeno que hay en él? Los primeros núcleos que se formaron en el universo unos pocos minutos después de que ocurriera la Gran Explosión (más conocida por la expresión inglesa *Big Bang*), fueron los átomos de hidrógeno y helio, junto con pequeñas cantidades de litio, y aún menos de berilio. Los átomos (el núcleo junto con los electrones) se formaron unos 300 000 años después. Y habría que esperar alrededor de 100 millones de años para que nacieran las primeras estrellas y con ellas, el resto de los elementos.

Casi todos los elementos de la tabla periódica (excepto unos pocos que se ha generado el ser humano en el laboratorio) proceden de las estrellas. Muchos se producen en el interior de ellas por medio de reacciones nucleares, otros durante la explosión de supernovas, y unos pocos en reacciones inducidas por los rayos cósmicos. Cuando una estrella llega al final de su vida, expulsa al medio interestelar todo el material que la conforma y los elementos que produjo a lo largo de su vida comienzan a viajar por el espacio. Eventualmente, nacerán nuevas estrellas hechas de los restos de las generaciones anteriores. Nosotros no somos la excepción, cada átomo que forma parte de nosotros, de nuestro planeta y de nuestro sistema solar, procede de una u otra forma de las estrellas ya muertas.



Figura 1. Lyngbya, cianobacteria recogida en Baja California, México. Fuente: wikipedia.

Las altas temperaturas que se alcanzan en los núcleos de las estrellas (cientos de millones de grados) permiten que los núcleos más ligeros (con un número atómico menor) se fusionen para formar progresivamente otros más pesados (con un número atómico mayor). Además, en este proceso se libera energía en forma de radiación electromagnética. El camino que se sigue en la tabla periódica es el siguiente: la fusión (o combustión) de hidrógeno produce helio; la de helio produce carbono y un poco de oxígeno; la de carbono produce varios elementos como oxígeno, neón, sodio y magnesio, y así sucesivamente hasta llegar al hierro. A partir de aquí, en lugar de producir energía (reacción exotérmica), se necesita inyectar energía para que la reacción ocurra (reacción endotérmica). Los elementos que están por encima del hierro en la tabla periódica se forman a partir de otros procesos, como la captura de neutrones y protones.

¿Hasta dónde puede llegar una estrella en la fabricación de elementos mediante reacciones nucleares a lo largo de la tabla periódica? Eso depende principalmente de la temperatura que se alcanza en el núcleo de la estrella, y ello, a su vez, de su masa inicial. Por ejemplo, las estrellas de baja masa, aquellas con menos de ocho veces la masa del Sol, no consiguen llegar a más de 500 millones de grados necesarios para que los átomos de carbono

**TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS**

Origen

- Big Bang
- Rayos cósmicos
- Pequeñas estrellas
- Grandes estrellas
- Supernovas
- Hecho en laboratorio

|   |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1   |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     | 2  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| H   |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     | He |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 3   | 4  |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 5   | 6  | 7   | 8  | 9  | 10 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Li  | Be |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | B   | C  | N   | O  | F  | Ne |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 11  | 12 |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 13  | 14 | 15  | 16 | 17 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Na  | Mg |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Al  | Si | P   | S  | Cl | Ar |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 19  | 20 | 21 | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34 | 35  | 36 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| K   | Ca | Sc | Ti  | V   | Cr  | Mn  | Fe  | Co  | Ni  | Cu  | Zn  | Ga  | Ge  | As  | Se | Br  | Kr |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 37  | 38 | 39 | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52 | 53  | 54 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Rb  | Sr | Y  | Zr  | Nb  | Mo  | Tc  | Ru  | Rh  | Pd  | Ag  | Cd  | In  | Sn  | Sb  | Te | I   | Xe |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 55  | 56 | 57 | 72  | 73  | 74  | 75  | 76  | 77  | 78  | 79  | 80  | 81  | 82  | 83  | 84 | 85  | 86 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Cs  | Ba | La | Hf  | Ta  | W   | Re  | Os  | Ir  | Pt  | Au  | Hg  | Tl  | Pb  | Bi  | Po | At  | Rn |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 87  | 88 | 89 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 114 |     | 116 |    | 118 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Fr  | Ra | Ac | Rf  | Db  | Sg  | Bh  | Hs  | Mt  | Ds  | Rg  | Cn  | --  |     | --  |    | --  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>58</td><td>59</td><td>60</td><td>61</td><td>62</td><td>63</td><td>64</td><td>65</td><td>66</td><td>67</td><td>68</td><td>69</td><td>70</td><td>71</td> </tr> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>90</td><td>91</td><td>92</td><td>93</td><td>94</td><td>95</td><td>96</td><td>97</td><td>98</td><td>99</td><td>100</td><td>101</td><td>102</td><td>103</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table> |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |
| 58  | 59 | 60 | 61  | 62  | 63  | 64  | 65  | 66  | 67  | 68  | 69  | 70  | 71  |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Ce  | Pr | Nd | Pm  | Sm  | Eu  | Gd  | Dy  | Ho  | Er  | Tm  | Yb  | Lu  |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 90  | 91 | 92 | 93  | 94  | 95  | 96  | 97  | 98  | 99  | 100 | 101 | 102 | 103 |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Th  | Pa | U  | Np  | Pu  | Am  | Cm  | Bk  | Cf  | Es  | Fm  | Md  | No  | Lr  |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Figura 2. La tabla periódica de los elementos especificando el origen de cada uno de ellos. Fuente: new-universe.org. Crédito: Nina McCurdy.

**De no ser por las cianobacterias, que transformaron la atmósfera terrestre, la vida tal y como la conocemos, no se hubiera desarrollado**

se fusionen. Entonces, al hacer referencia los tres elementos más abundantes en el universo después del hidrógeno y el helio, el oxígeno, el carbono y el nitrógeno, en general, se considera que el primero es producido sólo en las estrellas masivas; el segundo, tanto en las masivas como en las de baja masa, y el tercero es sólo en las estrellas de baja masa (figura 2).

**¡Las estrellas pequeñas también importan!**

En una investigación reciente, la autora de este artículo, Christophe Morisset y Manuel Peimbert del Instituto de Astronomía de la UNAM; Mónica Rodríguez del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica,

Figura 3. La nebulosa de Orión es una región H II dentro de nuestra Galaxia. Está situada a unos 1300 años-luz de la Tierra, al sur del Cinturón de Orión. Es una de las nebulosas más brillantes y puede observarse con telescopios de aficionado. Fuente: NASA. Crédito: Russell Croman.



de París, publicaron en la revista inglesa *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, el hallazgo de algunas estrellas de baja masa de nuestra Galaxia que están produciendo oxígeno (el artículo se puede leer en el enlace: <http://arxiv.org/abs/1502.06043>). Este resultado es nuevo y, además, muy interesante porque nos indica que no sólo las estrellas de alta masa son fábricas de oxígeno. Para llegar a este resultado hemos analizado la composición química de un grupo de nebulosas planetarias y regiones H II de nuestra galaxia con espectros de muy buena calidad que nos permiten obtener abundancias fiables de los distintos elementos que están en las nebulosas. La abundancia de un elemento nos indica su cantidad respecto a otro de referencia (generalmente se usa el hidrógeno); ésta puede expresarse en masa o en número de átomos.

**¿Cómo lo sabemos?**

Si queremos medir la cantidad de oxígeno que ha producido una estrella poco masiva durante su vida hay dos opciones: a) medir la cantidad de oxígeno que hay en la propia estrella (tomando directamente un espectro de ésta) o b) medir la canti-



Figura 4. Nebulosa planetaria M2-9, también conocida como la nebulosa mariposa por su morfología bipolar. Esta nebulosa se encuentra a 2 100 años luz de nosotros, en la constelación de Ofiuco.

dad de oxígeno que hay en el material expulsado por ella al final de su vida (tomando un espectro del gas a su alrededor); también habrá que tener en cuenta cuál era la abundancia inicial de oxígeno en la región donde se formó la estrella. Nosotros hemos utilizado la segunda opción.

En las galaxias, además de estrellas, hay varios tipos de nebulosas (que no son más que nubes de gas y polvo), aquí nos vamos a concentrar en dos: las nebulosas planetarias y las regiones H II; ambas son nebulosas fotoionizadas (es decir, ionizadas por los fotones que emiten las estrellas). Estos dos tipos producen espectros con líneas de emisión muy brillantes (figuras 5 y 6) y, como la física involucrada en las regiones H II y las nebu-

las planetarias es similar, el modo de analizarlas y calcular su composición química es el mismo. Esto es muy útil porque, aunque se estudian mediante los mismos procedimientos, nos proporcionan información distinta, pero complementaria.

Las regiones H II son nubes de gas y polvo del medio interestelar que están siendo ionizadas por la radiación ultravioleta de estrellas masivas cerca de ellas. Por tanto, cuando calculamos la cantidad de oxígeno, carbono o cualquier otro elemento en una región H II, lo que obtenemos es precisamente la cantidad de oxígeno, carbono, etcétera, que hay en el medio interestelar en este momento. En cambio, las nebulosas planetarias están formadas por el material expulsado mediante vientos por las

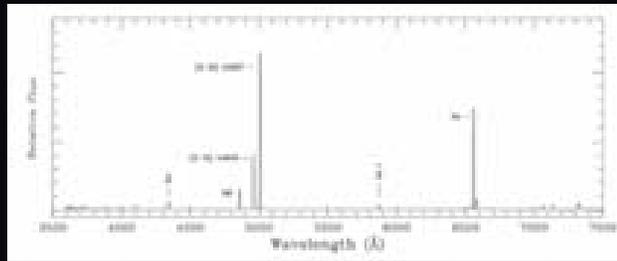


Figura 5. Leyes de Kirchhoff-Bunsen. Se muestra cómo se forman los diferentes tipos de espectros según sea el objeto que estamos observando (una nube de gas, una estrella o una nube de gas iluminada por una estrella). Fuente: [www-revista.iaa.es](http://www-revista.iaa.es)

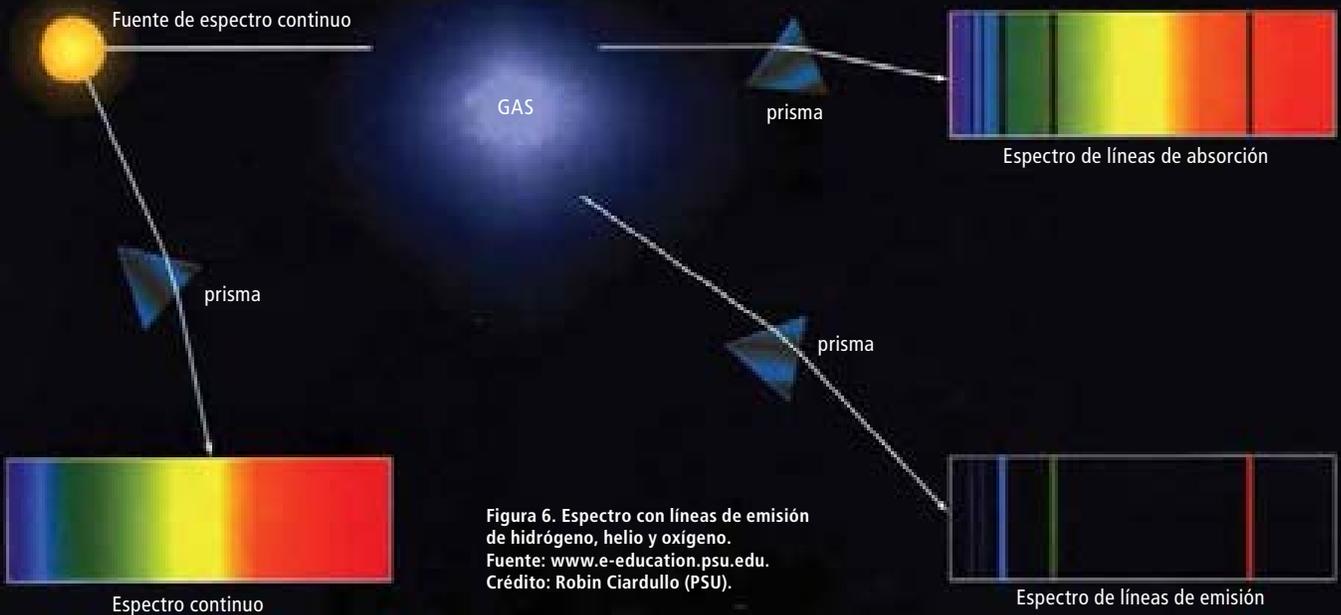


Figura 6. Espectro con líneas de emisión de hidrógeno, helio y oxígeno. Fuente: [www.e-education.psu.edu](http://www.e-education.psu.edu). Crédito: Robin Ciardullo (PSU).



■ Doctora en Ciencias con especialidad en Astrofísica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Es investigadora posdoctoral en Instituto de Astronomía de la UNAM y está involucrada en varios proyectos teóricos y observacionales para tratar de entender mejor qué elementos se producen en las estrellas, en qué cantidad y de qué forma afecta esto a la evolución química de las galaxias.

estrellas poco masivas al final de su vida, y la misma estrella que lanzó el material lo está ionizando. Por ello, cuando calculamos la cantidad de oxígeno, carbono o cualquier otro elemento en una nebulosa planetaria, lo que estamos obteniendo es la que había en la región donde se formó la estrella más/ menos la cantidad del elemento que se haya producido/destruido —aunque sólo hemos hablado de la posibilidad de que se produzcan elementos en las estrellas poco masivas, también hay mecanismos que disminuyen las abundancias, por ejemplo la *Hot Bottom Burning* en inglés (que se podría traducir como combustión en la base caliente) puede destruir átomos de oxígeno en una estrella dentro de la estrella durante su vida.

La comparación entre las abundancias de diferentes elementos (como oxígeno, cloro, argón, neón, entre otros) de las regiones H II y de las nebulosas planetarias de nuestra muestra nos ha permitido encontrar evidencias de que algunas de las estrellas progenitoras de las nebulosas planetarias han tenido que producir algo de oxígeno en su interior.

#### ¿Cuál es la clave detrás del misterio?

La mayoría de los modelos teóricos no predicen una producción de oxígeno en las estrellas de baja masa de nuestra galaxia porque suponen que aunque sí se fabrica en el núcleo de éstas, no llega hasta la superficie. Si no llega a las capas más externas, no será eyectado (expulsado) en la fase de los vientos y, entonces, no podremos observarlo en la etapa de nebulosa planetaria. Sin embargo, existen otros modelos que suponen que

existe un transporte eficiente del oxígeno producido en el núcleo hacia la envoltura de la estrella. Si el oxígeno es llevado hasta la superficie, podremos medirlo en las nebulosas planetarias, que es precisamente lo que nosotros hemos encontrado.

Nuestro resultado indica que, al menos en algunas de las estrellas poco masivas, el oxígeno producido en el interior (aunque sea poco), consigue llegar a la superficie y ser expulsado al medio interestelar junto con los otros elementos. Esto es algo que ya sabemos que ocurre en otras galaxias de baja metalicidad, es decir, con pocos metales (en astronomía llamamos 'metales' a todos los elementos que no son ni hidrógeno ni helio), pero que hasta ahora no se había observado en nuestra galaxia, cuya metalicidad es relativamente alta.

#### ¿Qué sigue?

En este momento estamos realizando modelos de evolución química que nos permitan saber exactamente cuánto del oxígeno que hay en nuestra galaxia viene de las estrellas poco masivas. También queremos saber qué ocurre en otras galaxias cercanas de menor metalicidad, como las Nubes de Magallanes, y para ello necesitamos obtener datos de muy buena calidad usando telescopios grandes. Además, nuestros resultados ayudarán a pulir los modelos de nucleosíntesis estelar que ya existen.

Como casi siempre ocurre en la ciencia, un pequeño resultado abre una multitud de caminos y problemas nuevos a explorar. ☞