

Astrofísica General

(sólo para estudiantes de física)

Dr. José Antonio García Barreto

Profesor de Asignatura, Facultad de Ciencias,
Investigador Titular B, Instituto de Astronomía
Universidad Nacional Autónoma de México

Material Didáctico para utilizar en el curso de ***Astrofísica General*** ofrecido en la Facultad de Ciencias a nivel licenciatura para estudiantes de física.

**Energía necesaria para
el proceso de Ionización
de los átomos de H,
He, C, N, O y Fe**

En el Universo existe gas entre las estrellas, conocido comúnmente como material interestelar, y gas entre las galaxias, conocido comúnmente como material intergaláctico.

En general cuando hablamos de estrellas son debemos de dar cuenta que son esferas de gas en equilibrio hidrostático, es decir, existe la fuerza de radiación que trata de expandir las capas de gas de las estrellas a distancias mayores desde el centro, y existe la fuerza de gravitación que trata de contraer todas las capas de gas en la estrella hacia el centro. Por muchos años, dependiendo del tipo espectral de la estrella en la secuencia principal, estas dos fuerzas están en equilibrio y son las fuentes de luz y radiación electromagnética que observamos en la bóveda celeste.

La fuerza de radiación, en términos simples, es el resultado de las reacciones termonucleares en el interior (centro) de las estrellas para transformar átomos ligeros en átomos más pesados, por ejemplo: transformar núcleos de átomos de hidrógeno en núcleos de átomos de helio. El átomo de helio es más pesado y tiende a poblar el centro de la estrella. Al paso del tiempo y la tasa de reacciones termonucleares, el centro de la estrella sólo contine núcleos de átomos de helio, y las reacciones termonucleares se deben realizar en las capas justo alrededor del centro. En el centro la temperatura aumenta, y eventualmente existen reacciones termonucleares para transformar núcleos de átomos de helio en núcleos de átomos de carbono. El carbono es mas pesado que el hidrogeno y que el helio y se establece en el

centro de la estrella. La temperatura sigue en aumento en el centro y ahora los núcleos de los átomos de carbono son parte de reacciones termonucleares para formar núcleos de átomos de nitrógeno y de oxígeno, y así sucesivamente hasta producir núcleos de átomos de hierro (Fe). Eventualmente las reacciones termonucleares para producir núcleos de átomos más pesados son endotérmicas, en vez de exotérmicas. En ese momento cesan o terminan las reacciones termonucleares exotérmicas y finaliza o deja de existir la fuerza radiativa.

El origen del material interestelar es el resultado de los procesos (casi simultáneos) de 1) la implosión de las capas internas de diferentes estrellas al cesar las reacciones exotérmicas en su interior y por ende la fuerza de gravedad gana para llevar todo ese gas hacia el centro y 2) la explosión de las capas internas, pero principalmente externas de la estrella. Estas capas salen con velocidades muy grandes y viajan a distancias cada vez mayores, escapando de la fuerza de gravedad del remanente de la estrella original, que dependiendo de su masa original, puede ser una estrella enana blanca, una estrella de neutrones o en el extremo podría ser un objeto compacto con gran masa, conocido como hoyo negro.

Estas capas exteriores en expansión dan lugar a Nebulosas Planetarias, o a lo que se conoce comúnmente como Supernovas.

El gas viaja alejándose cada vez más de la estrella original y como ya contiene núcleos de átomos más pesados que el

hidrógeno y el helio, se dice que enriquece el material entre una estrella y otra.

Los núcleos de átomos tienen protones con carga eléctrica positiva y neutrones sin carga eléctrica. Al bajar la temperatura, esos núcleos de átomos pueden atrapar electrones con carga eléctrica negativa y así formar lo que se conoce como átomos neutros (en el caso ideal de que haya tantos electrones alrededor del núcleo como protones dentro del núcleo).

Así por ejemplo un átomo de hidrógeno neutro tiene un protón en su núcleo y un electrón a su alrededor; un átomo neutro de helio tiene 2 protones en su núcleo y 2 electrones a su alrededor; un átomo neutro de carbono, tiene 6 protones en su núcleo y 6 electrones a su alrededor; un átomo neutro de oxígeno tiene 8 protones en su núcleo y 8 electrones a su alrededor y como último ejemplo un átomo neutro de hierro tiene 26 protones en su núcleo y 26 electrones a su alrededor.

Resultados de mecánica cuántica para explicar la distribución electrónica alrededor de los diferentes núcleos nos indican que los electrones ocupan diferentes capas. Existe la primera capa que tiene a su vez dos subcapas. Las capas se denominan por su número consecutivo, por ejemplo, 1, 2, 3, 4, etc. Las subcapas se denominan por diferentes letras, por ejemplo s, p, d, etcétera.

A su vez, las diferentes subcapas, pueden permitir la existencia de un número de electrones. Por ejemplo en la subcapa s pueden existir un máximo de 2 electrones. En la

subcapa p pueden existir un máximo de 6 electrones. En la subcapa d pueden existir un máximo de 10 electrones.

En forma sencilla, la denominación de la distribución electrónica para el átomo neutro de hidrógeno es $1s^1$.

La denominación de la distribución electrónica para el átomo neutro de helio es $1s^2$.

La denominación de la distribución electrónica para el átomo neutro de carbono es $1s^2 2s^2 2p^2$.

La denominación de la distribución electrónica para el átomo neutro de oxígeno es $1s^2 2s^2 2p^4$.

Y como ejemplo final, la denominación de la distribución electrónica para el átomo neutro de hierro es

$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$.

Al proceso de liberar, con la energía suficiente, uno o varios electrones de un átomo neutro se le conoce como *Proceso de Ionización*.

En astronomía y astrofísica la nomenclatura para el átomo neutro de hidrógeno es H I y se pronuncia ache uno (el número uno es número romano). Para el helio es He I, para el carbono es C I, para el nitrógeno es N I, para el oxígeno es O I, y finalmente para el hierro es Fe I.

Si al átomo neutro de hidrógeno se le libera al electrón, entonces la nomenclatura es H II y se pronuncia ache dos y se dice que el gas hidrógeno está ionizado.

Si al átomo neutro de helio se le libera un electrón, entonces la nomenclatura es He II y se dice que el gas helio está una vez ionizado. Si al átomo neutro de helio se le liberan sus dos electrones, entonces la nomenclatura es He III y se dice que el gas helio está dos veces ionizado.

Si al átomo neutro de carbono se le libera un electrón, entonces la nomenclatura es C II y se dice que el gas carbono está una vez ionizado, si se le liberan 2 electrones la nomenclatura es C III y se dice que está 2 veces ionizado, C IV significa que está 3 veces ionizado, C V significa que se le han liberado 4 electrones y se dice que está cuatro veces ionizado. La nomenclatura O III indica que se le han quitado 2 electrones, y O V significa que se le han liberado sus 4 electrones más externos. La nomenclatura Fe IV significa que al átomo neutro de hierro se le han liberado sus tres últimos electrones y Fe VII significa que se le han liberado sus últimos 6 electrones.

La energía para liberar electrones aumenta con el grado de ionización.

En la tabla siguiente se muestran las energías necesarias para los diferentes procesos de ionización para una muestra de átomos. 1 eV equivale a una energía de 1.602176×10^{-12} ergs o una temperatura absoluta equivalente de 11,604 grados Kelvin. En general, se adopta las reglas de mecánica estadística y para ionizar el átomo de hidrógeno 13.6 eV equivalen a una temperatura de 10,000 grados Kelvin.

Atomo	Capa Electrónica	Grado de Ionización		Energía, eV
1H	$1s^1$	1	H II	13.600
2He	$1s^2$	1	He II	24.590
		2	He III	54.416
6C	$2p^2$	1	C II	11.260
		2	C III	24.380
	$2s^2$	3	C IV	47.887
		4	C V	64.492
7N	$2p^3$	1	N II	14.534
		2	N III	29.601
		3	N IV	47.448
	$2s^2$	4	N V	77.472
8O	$2p^4$	1	O II	13.618
		2	O III	35.717
		3	O IV	54.934
		4	O V	77.413
	$2s^2$	5	O VI	113.900
${}^{26}Fe$	$4s^2$	1	Fe II	7.870
		2	Fe III	16.160
	$3d^6$	3	Fe IV	30.651
		4	Fe V	54.800
		5	Fe VI	75.500
		6	Fe VII	100.000