



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

***PROPUESTA DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE LA
NUCLEOSÍNTESIS***

**TESIS MANCOMUNADA
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO**

PRESENTAN

Miguel Ángel Cortés Amado

Roberto Francisco Cerón González



MÉXICO, CDMX

AÑO: 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dra. María Kenia Zamora Rosete
VOCAL: Dr. Carlos Cosio Castañeda
SECRETARIO: Dr. Juan Manuel Echevarría Román
1er. SUPLENTE: Dr. Baldomero Gómez Reyes
2° SUPLENTE: Dr. Bruno Christian Landeros Rivera

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

FACULTAD DE QUÍMICA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ASESOR DEL TEMA:



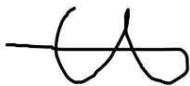
Dr. Juan Manuel Echevarría Román

SUPERVISOR TÉCNICO:



Dr. Carlos Cosio Castañeda

SUSTENTANTES:



Miguel Ángel Cortés Amado



Roberto Francisco Cerón González

Agradecimientos de Miguel Ángel Cortés Amado:

A la UNAM por brindarme la oportunidad de cursar estudios de bachillerato en la ENP y de licenciatura en la Facultad de Química.

A todos los profesores de la Facultad de Química que realmente se apasionan por compartir el conocimiento y aquellos para los cuales sus alumnos son más que simples números en una lista.

Al Dr. Juan Manuel Echevarría Román por todo su apoyo para realizar esta tesis, por todo el tiempo que nos brindó para que fuera posible, por todo su conocimiento y por aventurarse con nosotros a realizar esta tesis.

Al Dr. Carlos Cosío Castañeda por apoyarnos dándonos su asesoría en todo lo relacionado a la parte química de esta tesis y por brindarnos su tiempo y espacio con su grupo de Química Inorgánica.

A los alumnos del grupo que nos apoyaron leyendo la unidad didáctica, respondieron las actividades y nos apoyaron a la validación de esta.

A todos mis amigos, que fueron llegando a lo largo de la carrera y que se quedaron en mi vida aun cuando nuestros caminos se separaran, Braulio Reyes, Monserrat González, Shaina Cuellar, Alexa Sarabia y Verónica Ruiz.

A mi familia, mis padres y hermano, ya que sin ellos todo esto no hubiera sido posible. Me dieron su apoyo incondicional en muchísimas formas y siempre confiaron en mí.

A mi profesora de química en la ENP #2, la Mtra. María Eugenia Martínez Yépez que fue la persona que me inspiró a estudiar química, inspiró mi amor por la ciencia y finalmente mi gusto por la docencia.

Finalmente, a una de las personas más importantes en mi vida, mi novia Isamar García Vaquera, quien me acompañó a lo largo de toda la carrera, me motivó a seguir adelante en mis peores momentos y siempre estuvo para mí cuando la necesité.

Muchas gracias a todos.

Agradecimientos de Roberto Francisco Cerón González:

En primera instancia me gustaría agradecer al Dr. Juan Manuel Echevarría Román por brindar una perspectiva de la ciencia mucho más amplia y darnos la confianza de aventurarnos en un campo desconocido para el químico.

Al Dr. Carlos Cosio Castañeda quien, a su vez, fue mi profesor de física en mi primer semestre de la carrera y me enseñó a siempre ir más allá de los cálculos y darle utilidad a los mismos.

A mis padres, abuelos y mi tío quienes me brindaron apoyo y la libertad de forjar mi camino.

A mi novia Diana Inés Campos Moreno, quien me motivó a seguir adelante y aventurarme a nuevos retos, me recordó la nobleza del mundo y lo grande que es cuando tienes amor en tu vida.

Así mismo, una especial mención al Dr. Adrián Vázquez Sánchez, quien me enseñó a confiar en mí mismo y a explotar mi curiosidad, al Dr. Ulrich Briones Guerash Silva, quien me demostró que el futuro siempre nos alcanza y algo complejo puede volverse sencillo y al Dr. Marcos Martínez García quien me dio un ejemplo de una persona llena de valores y trabajo puro.

Por último, me gustaría escribir una frase que Batman le dice a Superman:

“A pesar de nuestras diferencias siento un gran respeto por ti... Tu me enseñaste que la justicia no siempre debe surgir de la oscuridad”

Así, agradezco a esas personas que llegaron a mi vida para enseñarme lecciones y agradezco a aquellas que me ayudaron a comprenderlas y sobrellevarlas.

Gracias.

| | |
|---|-----------|
| 1.- Introducción: | 7 |
| 1.1.- Justificación de la investigación | 7 |
| 1.2.- Justificación del tema | 7 |
| 2.- Objetivos: | 10 |
| 2.1.- Diseño de la unidad didáctica | 10 |
| 2.2.- Validación de la unidad didáctica | 10 |
| 2.3.- Evaluación del aprendizaje | 11 |
| 3.- Marco teórico | 13 |
| 3.1.- Importancia de la ciencia | 13 |
| 3.2.- Estudio de la química y su conexión interdisciplinaria con la astronomía | 14 |
| 3.3.- Importancia de la astronomía en la química | 15 |
| 4.- Metodología | 17 |
| 4.1.- Habilidades profesionales del docente y el alumno | 17 |
| 4.2.- Diseño de la unidad didáctica | 18 |
| 4.3.- Validación, evaluación e intervención didáctica | 19 |
| 5.- Análisis de resultados | 26 |
| 5.1.- Unidad didáctica | 26 |
| 5.2.- Validación | 61 |
| 5.3.- Evaluación | 67 |
| 5.4.- Correcciones a la unidad didáctica | 69 |
| 6.- Conclusiones | 72 |
| 6.1.- Sobre el diseño de la unidad didáctica | 72 |
| 6.2.- Sobre la validación de la unidad didáctica | 72 |
| 6.3.- Sobre la evaluación del aprendizaje | 72 |
| 7.- Bibliografía | 74 |

INTRODUCCIÓN

1.- Introducción:

1.1.- Justificación de la investigación

De acuerdo con la Real Academia Española, lo interdisciplinario es aquello que se realiza con la cooperación de varias disciplinas. La química y la astronomía son dos importantes áreas de estudio, sin embargo, no es muy común encontrar una relación entre ellas. Como mencionan Chávez et al. (2015), un problema astronómico puede dividirse en problemas más pequeños que individualmente pueden tratarse en el ámbito de alguna disciplina como lo puede ser, por ejemplo, la química, y su integración en un proyecto docente permite el desarrollo de las habilidades de investigación y el trabajo en equipo de los alumnos.

Así mismo, Herrera et al. (2015) señalan que la astronomía permite explorar el mundo desde diferentes perspectivas. Es un tema de estudio interesante para el público y, además, es una oportunidad para comprender que el conocimiento se construye desde los saberes específicos de diferentes disciplinas que interactúan y se integran para construir un conocimiento significativo y estructurado.

Al realizar una investigación particular entre la relación de la química y la astronomía, Escalante y Gasque (2012) dicen:

Los estudiantes de licenciaturas de Química emplean la materia tanto en forma elemental como en sus infinitas formas combinadas para transformarla y aprovecharla. En la mayoría de los casos se presta poca o nula atención a la historia que la ciencia ha construido sobre su origen. Varias razones explican lo anterior. Por una parte, los mecanismos de nucleosíntesis son campo de estudio de la astrofísica, la cual, en general, es ajena a los químicos... Por otra parte, la literatura sobre este tema es muy especializada y casi siempre está en inglés. Además, la literatura de divulgación en español está a un nivel demasiado superficial.

De acuerdo con lo anterior, esta investigación se centra en dar a conocer con mayor detalle el campo de estudio de la astrofísica a los químicos, en particular a través de los procesos de nucleosíntesis.

1.2.- Justificación del tema

La mayoría de los estudiantes han tenido contacto con la química desde el nivel medio superior; sin embargo, estos carecen de conocimientos generales de astronomía y por ello resulta de especial interés destacar que, en realidad, dichos conocimientos astronómicos pueden contribuir en el área de la química debido a que su estudio no se limita a lo que se experimenta en nuestro planeta como menciona Hudson (2006).

Estudiando el origen del universo se puede analizar, en particular, la formación de los elementos químicos en un proceso conocido como la nucleosíntesis. Sin embargo, en el área de la química no es considerado un tema de interés y relevancia, siendo que tener presente los orígenes de los elementos químicos abarca un amplio campo de estudio en el área de la astronomía, Martínez (2012).

En la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular en la materia de tercer semestre Química Inorgánica I, se da un atisbo de este tema y, aunado al hecho de una investigación en profundidad de temas que relacionen la astronomía con la química, la nucleosíntesis indica ser aquel tema de mayor conexión y relevancia para el estudiante de química. Como indica Rauscher (2020):

Los estudios de nucleosíntesis tienen como objetivo comprender el origen y las cantidades relativas (abundancias) de los nucleidos (elementos y sus isótopos) que se encuentran en el Universo y, más concretamente, de sus cantidades relativas (abundancias).

Sin embargo, la literatura e investigación que rodean a la nucleosíntesis son enfocados al área de la astronomía y, generalmente, en el idioma inglés, por lo que para un estudiante de química y, en particular de México o países hispanohablantes, resulta complejo adentrarse en el estudio de la nucleosíntesis.

Por lo antes mencionado, la justificación de escoger el tema de nucleosíntesis es el de generar material didáctico de calidad y con un mayor enfoque en el área de la química ya que aporta un mayor conocimiento sobre el origen y evolución de los elementos que se estudian a lo largo de la carrera.

OBJETIVOS

2.- Objetivos:

2.1.- Diseño de la unidad didáctica

Para el desarrollo de esta tesis se pretende desarrollar una relación entre la astronomía y la química. Para ello es conveniente utilizar un concepto que se conoce como una unidad didáctica.

De acuerdo con García y Garritz (2006), una unidad didáctica es un instrumento para desarrollar las formas más útiles de representación de ideas; las analogías, ilustraciones, ejemplos, explicaciones y demostraciones más poderosas; en pocas palabras, las formas de representación y formulación del tema que lo hace comprensible a otros.

Con base en lo anterior, se pretende realizar una unidad didáctica que permita organizar mejor el aprendizaje que se quiera transmitir, así como la forma de evaluación del aprendizaje. Planificar de manera correcta actividades, tiempo, secuencia, será de especial importancia ya que como menciona Tórrez (2016), ayuda a lograr los objetivos propuestos, se logra cumplir con las expectativas de los estudiantes y no se entorpece el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Como se encontró en Malpica (2021), tener presente las características de la unidad didáctica mejora el desempeño, facilita la labor docente, permite la motivación, el aprendizaje significativo y mayor compromiso de los estudiantes. Por todo esto es recomendado tenerlo presente en la educación superior. Así entonces, el objetivo es diseñar una unidad didáctica con el tema propuesto en esta tesis.

2.2.- Validación de la unidad didáctica

Una vez realizada la unidad didáctica, será necesario corroborar que esta cumpla con los objetivos planteados. Por ello será necesario encontrar herramientas de validación que nos permitan corroborar que se logran alcanzar los objetivos.

De acuerdo con el CEM (Centro Español de Metrología), la validación es una verificación de que los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto. En el proceso de la construcción de esta unidad didáctica, la medición de variables requiere de instrumentos válidos y confiables. Como mencionan Villavicencio-Caparó et al. (2016), válidos porque miden lo que deben medir y confiables porque pueden repetir la misma medida en condiciones similares.

En este contexto, solo se pueden validar instrumentos que evalúan variables psicométricas, que también se conocen como variables psicológicas (motivación, aprendizaje, actitudes y aptitudes, etc.) (Adrogué et al., 2021). Si un instrumento es válido tiene significancia social y puede asumir una función, por ejemplo, científica.

Para esta tesis se hará uso de un escalamiento tipo Likert que consiste en un conjunto de ítems presentados en forma de afirmaciones o juicios ante los cuales se pide la reacción de los sujetos a los que se les administra. Es decir, se presenta cada afirmación y se pide al sujeto que externé su reacción eligiendo uno de los puntos de la escala. A cada punto se le asigna un valor numérico. Así, el sujeto obtiene una puntuación respecto a la afirmación y al final se obtiene su puntuación total sumando las puntuaciones obtenidas en relación con todas las afirmaciones (Hernández et al., 1991).

Así mismo, se aplicará el diferencial semántico de Osgood que consiste en una serie de adjetivos extremos que califican al objeto de actitud, ante los cuales se solicita la reacción del sujeto. Es decir, este tiene que calificar al objeto de actitud en un conjunto de adjetivos bipolares, entre cada par de adjetivos se presentan varias opciones y el sujeto selecciona aquella que refleje su actitud en mayor medida, por lo que se puede decir que esta es una evaluación psicológica.

Así, se propone como segundo objetivo la edificación de un instrumento adecuado para la validación objetiva y rigurosa de la unidad didáctica.

2.3.- Evaluación del aprendizaje

Evaluar la calidad del aprendizaje es fundamental para su desarrollo y obtener mejores resultados con el paso del tiempo. De acuerdo con Fernández (2017), una aproximación al concepto de evaluación puede ser la valoración que se lleva a cabo a partir de la observación y análisis de los datos, ya sea del proceso de aprendizaje con el fin de tomar decisiones orientadas a mejorar el trabajo y ayudar a progresar, o de la consecución de unos objetivos o del nivel del dominio en el uso de la lengua, con el fin de llevar a cabo un juicio o una calificación.

Es así como el tercer objetivo de esta tesis es el de realizar una evaluación que nos permita entender las necesidades particulares de aprendizaje de los estudiantes y lograr un mejor desarrollo educativo.

MARCO TEÓRICO

3.- Marco teórico

3.1.- Importancia de la ciencia

La docencia en la ciencia es una consecuencia lógica para explicar los avances de la investigación, que en cada disciplina se realiza como el objetivo prioritario para entender el mundo que nos rodea. En otras palabras, la investigación en cada disciplina es el punto nodal para entender nuestro universo, siendo la docencia un segundo paso lógico para lograr que los estudiantes, que se inician en cada disciplina científica alcancen un nivel de investigación que se convierta precisamente en este objetivo primario. Este paso de la docencia tiene, en el caso de la química y la astronomía, herramientas propias para su desarrollo, enseñanza y aprendizaje. La ciencia tiene una enorme variedad de disciplinas y modos para abordar y abundar en su conocimiento, que se basan fundamentalmente en el método científico. Definir la ciencia, de cualquier modo, es un tema complejo, que podría incluso ser el tema de una tesis. Basta con mencionar como ejemplo el estudio de la Filosofía de la Ciencia. Incluso disciplinas como la ética y la lógica pueden incidir en la definición de ciencia. Sin embargo, como menciona Torres (2010):

La ciencia por sí sola no contribuirá a que el mundo sea un lugar mejor, aprender, hechos, teorías, fórmulas y métodos de la investigación científica, entre otros; sin considerar los impactos que tienen en la vida cotidiana no favorecerá a que los estudiantes mejoren sus vidas. Es necesario entender cómo la ciencia y, sobre todo, la educación científica puede alfabetizarnos para ayudar a que todos los habitantes del planeta, logremos un ambiente sano y en equilibrio con el fin de construir un mundo de cambio en las formas como sea ha enseñado y se ha hecho ciencia hasta ahora, para potenciar nuevas formas de pensar, enseñar y aprender.

Esto nos da pauta para entender la importancia de la ciencia y, sobre todo, valorar su importancia a nivel académico y social. También es importante resaltar, como dice Feynman (2001), que no es lo mismo hablar de *qué es la ciencia* (divulgación), que *cómo enseñar la ciencia* (enseñanza) o de *cómo desarrollar la ciencia* (investigación). Estos son los tres polos sustantivos que tiene, en particular, la Universidad Nacional Autónoma de México.

Con respecto a este cuestionamiento sobre la enseñanza de la ciencia (segundo polo), Torres (2010) también menciona que hay que crear y formar seres humanos *con ciencia*, pero también con *consciencia*, y podría decirse que esta afirmación constituye la principal tarea de la enseñanza en la ciencia contemporánea.

3.2.- Estudio de la química y su conexión interdisciplinaria con la astronomía

Definir a la química, actualmente pareciera algo trivial como lo expone Brown (2014) al mencionar que la química implica estudiar las propiedades y el comportamiento de la materia, o Chang (2017) cuando sugiere que la química es el estudio de la materia y los cambios que ocurren en ella. Sin embargo, Izquierdo (2004) expone que la química es una ciencia muy concreta y abstracta y la relación entre los cambios que se observan y las explicaciones no es evidente ya que se habla de los cambios químicos con un lenguaje particular que es muy distinto del que se conoce y utiliza el alumnado en la vida cotidiana.

Podemos decir, en retrospectiva, que la química no es sencilla de definir ya que puede ser analizada en diferentes escalas (microscópica y macroscópica) con diversos enfoques (experimental, práctico y/o teórico) y, aunado a esto, requiere de otras disciplinas que contribuyan a dar nuevos enfoques y herramientas que son necesarios para el entendimiento de la química.

Para dar una muestra de este razonamiento, si se considera que la química orgánica es la *química del carbono*, entonces la química inorgánica es la química de todos los elementos excepto el carbono. En su sentido más amplio, esto es cierto, pero, por supuesto, hay intersecciones entre las ramas de la química. Un ejemplo en la actualidad es la química de los fulerenos. La comprensión de tales moléculas, nanotubos de carbono y láminas de grafeno implica estudios realizados por químicos orgánicos e inorgánicos, fisicoquímicos, físicos y científicos de materiales. La química inorgánica no es simplemente el estudio de elementos y compuestos; es también el estudio de los principios físicos (Housecroft y Sharpe, 2012).

Para esta tesis se hará uso de un área en particular conocida como química nuclear. Como mencionan Loveland et al. (2006), esta rama de la química consiste en 4 postulados:

- A) Estudios de las propiedades químicas y físicas de los elementos más pesados en los que la detección de la desintegración radiactiva es parte esencial del trabajo.
- B) Estudios de las propiedades nucleares como la estructura, las reacciones y la mencionada desintegración radiactiva.
- C) Estudios de fenómenos macroscópicos (como la geocronología o la astrofísica) en los que los procesos nucleares están íntimamente implicados.
- D) La aplicación de técnicas de medición basadas en los fenómenos nucleares (como la medicina nuclear o el análisis de activación).

Con esto en mente, el postulado C) nos muestra una relación clara entre el área de la química y el área de la astrofísica. Esto se verá con mayor detalle en el siguiente apartado.

3.3.- Importancia de la astronomía en la química

De manera básica podemos definir a la astronomía como la ciencia que estudia al universo en su conjunto. Casi toda la investigación astronómica moderna tiene un gran contenido de física, por lo que en la actualidad los términos *astronomía* y *astrofísica* son sinónimos.

Así, se puede plantear un uso de la astronomía como mencionan Santiago et al. (2011) donde no es solo un área de interés sino también una herramienta cultural e integradora del aprendizaje interdisciplinario.

Como se mencionó en el apartado anterior, la química nuclear presenta la relación más clara entre la química y la astrofísica y esto se puede corroborar con la manera en que un astrofísico utiliza la física nuclear. Como menciona Rauscher (2020), se requiere de una breve introducción a la física y las propiedades nucleares. Esto proporciona la base para comprender las transformaciones nucleares en plasmas estelares calientes a través de desintegraciones y reacciones nucleares. En resumen, se pueden interpretar como semejantes a la física y química nuclear, sin embargo, se hace una distinción entre ambas ramas ya que cada una posee un enfoque determinado.

Siendo más específico, en la astrofísica existe un campo de estudio conocido como *nucleosíntesis* que, de acuerdo con Clayton (1983), tiene como objetivo comprender el origen y cantidades relativas (abundancias) de los elementos y sus isótopos que se encuentran en el universo en un conjunto de entornos en los que los núcleos pueden sintetizarse mediante reacciones nucleares.

Como podemos notar, la astronomía está relacionada con la química mediante el estudio de fenómenos nucleares, en particular la nucleosíntesis. Sin embargo, en la docencia de la química no suele ser un tema de relevancia. Por ello, en esta tesis se realiza una unidad didáctica que apoye al proceso de enseñanza-aprendizaje de esta relación.

METODOLOGÍA

4.- Metodología

4.1.- Habilidades profesionales del docente y el alumno

Como parte importante de este trabajo se deben analizar las problemáticas relacionadas a la enseñanza de la ciencia y a la relación que tiene el profesorado con los estudiantes, en el caso particular de esta tesis, a nivel superior.

A los docentes de nivel superior se les plantea el reto de convertirse en investigadores de su propia tarea docente (Rodríguez, 2009). Dicho de otra manera, se desea que el docente no solo enseñe el conocimiento que ha adquirido a lo largo de su carrera sino también se actualice con una investigación continua en su área y así no caiga en transmitir conocimiento erróneo u obsoleto.

La educación contemporánea está sustentada en los cuatro pilares de la educación enunciados en el Informe a la UNESCO de la Comisión Internacional sobre la Educación para el siglo XXI, los cuales consisten en:

- Aprender a conocer: contenidos conceptuales como ideas, teorías, definiciones, representaciones, entre otros.
- Aprender a hacer: contenidos procedimentales como capacidades, destrezas, habilidades y estrategias.
- Aprender a ser: contenidos actitudinales como actitudes personales, autoestima, autonomía, responsabilidad, etcétera.
- Aprender a convivir: contenidos actitudinales como valores sociales, solidaridad, empatía, manejo de conflictos, entre otros.

Sin embargo, en el ámbito universitario es muy frecuente que puedan generarse situaciones de tensión entre las concepciones del docente y los factores institucionales como la estructura del plan de estudios, las modalidades de evaluación, los recursos disponibles, entre otros, que van a determinar finalmente las estrategias que el docente implementa en su enseñanza (Bueno, 2023).

Es necesario que la estrategia pedagógica incluya en sus propósitos el trabajo con las habilidades que se desea promover. Además, es sumamente importante poder hacer una evaluación de logros con la finalidad de hacer los ajustes o fortalecimientos de estrategias que muestren eficacia en cuanto al logro de metas planteadas. En este último punto entra el pensamiento crítico que es entendido como aquel que tiene un propósito, es razonado y dirigido a metas, además de contener un componente evaluativo del proceso mismo.

Adicionalmente, Rivas, et al. (2017) indica que “pensar críticamente es razonar y decidir para resolver problemas del modo más eficaz posible”.

Un conjunto de habilidades centrales del pensamiento crítico y sus destrezas asociadas identificadas por consenso de expertos son (Facione, 2020):

- Interpretación: categorizar, decodificar y clarificar significados
- Análisis: examinar ideas, identificar argumentos, razones y posturas
- Inferencia: consulta de evidencia, alternativas de conjeturas y obtener conclusiones lógicamente válidas y justificadas
- Evaluación: evaluar credibilidad de las afirmaciones y la calidad de los argumentos que se hicieron usando razonamiento inductivo o deductivo
- Explicación: enunciar resultados, justificar procedimientos y presentar argumentos
- Autorregulación: autocontrol y autocorrección

Así mismo, Bueno (2023) menciona que la comparación de estas habilidades y destrezas del pensamiento crítico con los procesos asociados a la práctica científica y con los aspectos y destrezas identificados para el pensamiento científico muestran un nivel de concordancia, por lo que se puede afirmar que la enseñanza de la ciencia y de habilidades de pensamiento crítico pueda realizarse de manera articulada, promoviendo que ambas se complementen y fortalezcan mutuamente.

4.2.- Diseño de la unidad didáctica

El diseño de la unidad se llevó a cabo con una previa investigación bibliográfica del tema. A continuación, se presenta una breve muestra de la unidad didáctica:

Nucleosíntesis:

Los estudios de nucleosíntesis tienen como objetivo comprender el origen y las cantidades relativas (abundancias) de los elementos y sus isótopos que se encuentran en el Universo. Mientras que el H, He y trazas de Li se originan a partir de la nucleosíntesis en el universo primitivo (nucleosíntesis primigenia), los elementos hasta el hierro se forman en la combustión estelar hidrostática (nucleosíntesis estelar). La mayoría de los elementos más allá del hierro se sintetizan en procesos de captura de neutrones (proceso S y nucleosíntesis explosiva) (Rauscher, 2020).

En la década de los 30's se empezó a aceptar que la energía estelar debía ser producida por la fusión nuclear. Fue Hans Bethe (1939) quien propuso formalmente el primer mecanismo para la producción de energía en las estrellas: el ciclo carbono-nitrógeno-oxígeno (CNO). Otros procesos importantes de generación de energía (las cadenas protón-protón y la reacción triple-alfa) no fueron propuestos sino hasta la década de los 50's.

Posteriormente se complementó la unidad con diversas figuras para facilitar a los estudiantes la comprensión del tema. Por ejemplo, la figura 9 que engloba la mayoría de las reacciones de los ciclos CNO para tener un mapa el cual seguir en el transcurso de estas (ver el material didáctico en la sección de análisis de resultados).

Para ayudar a que los estudiantes obtengan un aprendizaje significativo, la unidad se complementa con diversas actividades al final de la lectura (ver el material didáctico en la sección de resultados).

Finalmente, con el propósito de que el estudiante reafirme el conocimiento y pueda conocer su nivel de comprensión acerca de lo abordado en la unidad didáctica, se añadió una rejilla de autoevaluación y un registro de puntaje que además puede ser utilizado por el docente para evaluar las actividades de la unidad didáctica.

4.3.- Validación, evaluación e intervención didáctica

Para la validación se utilizaron dos herramientas: una escala de Likert combinada con un cuestionario de opinión y una prueba de diferencial semántico. Y para la evaluación una rejilla y un registro. Todas estas herramientas se muestran a continuación:

a) Escala de Likert y cuestionario de opinión:

Instrucciones: en cada inciso indique lo que se le solicita

1. ¿Qué tan comprensible es la unidad didáctica?

Mucho Suficiente Poco Nada

2. ¿Qué tanto las actividades le permitieron profundizar en el conocimiento del tema?

Mucho Suficiente Poco Nada

¿Por qué?

3. ¿Qué tanto considera que su conocimiento químico sobre el tema mejoró en comparación al que tenía antes de utilizar la unidad didáctica?

Mucho Suficiente Poco Nada

¿Por qué?

4. ¿Qué tan familiares le son los conceptos utilizados en esta unidad didáctica?

Mucho Suficiente Poco Nada

¿Por qué?

5. ¿Qué tanto considera que mejoró su conocimiento de nucleosíntesis en la química con respecto al que tenía antes de utilizar la unidad didáctica?

Mucho Suficiente Poco Nada

¿Por qué?

6. ¿Qué tan agradable le es el diseño de la unidad didáctica?

Mucho Suficiente Poco Nada

7. ¿Fueron de ayuda los diagramas utilizados en la unidad didáctica?

Mucho Suficiente Poco Nada

¿Por qué?

8. ¿Consideras que hay una relación lógica en el ordenamiento de la unidad didáctica?

Mucho Suficiente Poco Nada

¿Por qué?

9. ¿Considera que el contenido del prólogo le ayudó a comprender la unidad didáctica?

Mucho Suficiente Poco Nada

¿Por qué?

10. Por favor indique sugerencias o comentarios acerca de la unidad didáctica

b) Diferencial semántico

Instrucciones

Para cada uno de los siguientes adjetivos coloque una cruz en el punto que considera identifica su opinión sobre los adjetivos que mejor describen las actividades realizadas en este taller sobre la unidad didáctica:

Bueno : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Malo

Entretenido : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Aburrido

Útil : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Inútil

Profundo : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Superficial

Agradable : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Desagradable

Fácil : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Difícil

Lento : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Rápido

Extenso : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Breve

Directo : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Indirecto

Completo : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : _____ : Incompleto

c) Registro de experiencia de aprendizaje

Tabla 1: Registro de aprendizaje de cada actividad

| Aspecto evaluado | Puntos |
|---|--------|
| No se realiza la actividad | 0 |
| Se realiza correctamente la actividad relacionada con el conocimiento químico. | 1 |
| Se realiza correctamente la actividad relacionada con el saber químico y astronómico | 2 |
| Se realiza correctamente la actividad química y astronómica y se logra una integración de conocimiento entre ambas disciplinas. | 3 |

Tabla 2: Registro de aprendizaje de la unidad didáctica

| Actividad | Autoevaluación (puntos) |
|---|-------------------------|
| Etapas de los orígenes de los elementos químicos | /3 |
| Mapa de la evolución estelar del Sol en el Diagrama H-R | /3 |
| Estabilidad atómica | /3 |
| Decaimientos radioactivos | /3 |
| Total | /12 |

El registro de experiencia de aprendizaje tiene varias virtudes. La primera es que el alumno sabe en qué parte del proceso de aprendizaje se encuentra y, por lo tanto, deduce inmediatamente lo que le hace falta conocer o hacer. La segunda es que permite una evaluación objetiva y útil que puede emplearse con todos los alumnos de la misma manera. La tercera es que su realización toma poco tiempo (Chamizo, 1996).

En este caso se asignaron 3 puntos totales por característica que se desea evaluar, relacionándolas con el conocimiento químico, astronómico (de la química) y el conjunto de ambas características.

La intervención didáctica fue aplicada a un grupo de 37 estudiantes de la Facultad de Química de la UNAM que pertenecen a la materia de Química Inorgánica I. Se escogió a este grupo porque se consideró como una muestra representativa de la facultad ya que, al ser una materia de tronco común, los estudiantes de todas las carreras pasan por esta materia con un nivel de conocimiento similar.

Lo primero que se le pidió al grupo fue que leyeran el material que se puede ver en el apartado 5.1 Unidad Didáctica con una semana de antelación.

Ya en la sesión se sugirió al grupo que comentaran dudas sobre este material didáctico y se resolvieron al momento. Posteriormente se les dieron las actividades para que las resolvieran en un lapso de 1 hora con el material didáctico o cualquier material que requirieran. Así mismo, una vez concluido el tiempo, se les dieron las respuestas y sus respectivas justificaciones para que, posteriormente, utilizaran el registro de aprendizaje de la tabla 1 del inciso C de esta sección y se autoevaluaran.

Al finalizar la sesión, se les compartió un enlace de la herramienta digital educativa Google Classroom para que realizaran el cuestionario de opinión con escala de Likert (inciso A de esta sección) y el diferencial semántico (inciso B de esta sección) de manera virtual.

El tiempo total de la sesión fue de 1 hora y media y la intervención didáctica se organizó de acuerdo con el siguiente cronograma:

| Actividad | Tiempo aproximado para su realización |
|---|---------------------------------------|
| Lectura del material | 1 semana |
| Resolución de dudas acerca de la lectura | 15 minutos |
| Resolución de actividades | 1 hora |
| Explicación y resolución de la autoevaluación | 5 minutos |
| Explicación sobre la resolución del cuestionario de opinión con escala de Likert y el diferencial semántico | 10 minutos |
| Resolución y entrega del cuestionario de opinión con escala de Likert y el diferencial semántico | 1 semana |

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.- Análisis de resultados

5.1.- Unidad didáctica

ÍNDICE

1. **Prólogo**
2. **Nucleosíntesis primigenia**
 - 2.1 Estrellas primigenias y diagrama H-R
3. **Combustión estelar hidrostática**
 - 3.1 Combustión de hidrógeno
 - 3.1.1 Cadenas pp
 - 3.1.2 Neutrinos
 - 3.1.3 Ciclos CNO
 - 3.2 Combustión de helio y elementos diversos hasta el hierro
 - 3.2.1 Proceso triple alfa y captura de partículas alfa
 - 3.2.2 Destello en la capa de helio y generación de elementos hasta el hierro
4. **Origen de los elementos más allá del hierro**
 - 4.1 Proceso S
 - 4.2 Nucleosíntesis explosiva
5. **Actividades**

1. Prólogo

Este material didáctico tiene como objetivo enseñar química, así como su relación con la astronomía enfocada en la rama de estudio conocida como nucleosíntesis.

Los estudios de nucleosíntesis tienen como objetivo comprender el origen y las cantidades relativas (abundancias) de los elementos y sus isótopos que se encuentran en el Universo. Mientras que el H, He y trazas de Li se originan a partir de la nucleosíntesis en el universo primitivo (nucleosíntesis primigenia), los elementos hasta el hierro se forman en la combustión estelar hidrostática (nucleosíntesis estelar). La mayoría de los elementos más allá del hierro se sintetizan en procesos de captura de neutrones (proceso S y nucleosíntesis explosiva) (Rauscher, 2020).

En la década de los 30's se empezó a aceptar que la energía estelar debía ser producida por la fusión nuclear. Fue Hans Bethe (1939) quien propuso formalmente el primer mecanismo para la producción de energía en las estrellas: el ciclo carbono-nitrógeno-oxígeno (CNO). Otros procesos importantes de generación de energía (las cadenas protón-protón y la reacción triple-alfa) no fueron propuestos sino hasta la década de los 50's.

Previo al estudio en profundidad de la nucleosíntesis, algunos conceptos teóricos son necesarios para una mayor comprensión del tema.

Las partículas se pueden clasificar en función de las cuatro fuerzas fundamentales que actúan sobre ellas. La fuerza gravitacional actúa en todas las partículas, pero sus efectos al nivel de procesos subatómicos son tan débiles que no se necesita considerar esta fuerza (al menos no en la investigación actual). La fuerza electromagnética actúa en todas las partículas cargadas eléctricamente; sus efectos son bien conocidos y podemos tenerlos en cuenta cuando lo necesitemos. La fuerza fuerte es la fuerza que amarra a los nucleones (protones y neutrones) y la fuerza débil está involucrada en el decaimiento beta y procesos similares. La fuerza débil actúa en todas las partículas, la fuerza fuerte solo en algunas (Walker, 2014).

La interacción entre protones (que es la base de las cadenas pp mencionadas anteriormente), en términos de fuerza electromagnética genera repulsión con una barrera de Coulomb igual a 550 keV. Sin embargo, debido a una interacción débil, condiciones estelares como la temperatura (aproximadamente 15×10^6 K) y una cantidad muy grande de protones (cada segundo un aproximado de 3.4×10^{38} protones se combustionan), esta reacción puede llevarse a cabo por medio de un efecto túnel (en este caso, conocido como factor de Gamow) (Loveland, 2006).

Se mencionó que los elementos hasta el hierro se forman en la combustión estelar hidrostática (nucleosíntesis estelar). Dicho límite se puede explicar con la energía nuclear de enlace. Esta es una medida útil para saber que tan amarrado está un núcleo, es decir, que tan difícil sería dividir al mismo.

Se debe saber que la masa M de un núcleo es menor que la suma de masas de sus protones y neutrones. Así mismo, Einstein (1905) propuso que la energía es igual a la masa por la velocidad de la luz al cuadrado, $E=mc^2$. Derivado de esta equivalencia se deduce que la energía de un núcleo, Mc^2 , es menor que la suma de energías de sus protones y neutrones, $\Sigma(mc^2)$. La diferencia entre estas dos energías es la llamada energía nuclear de enlace:

$$\Delta E_{EE} = \Sigma(mc^2) - Mc^2$$

Se debe aclarar que la energía nuclear de enlace no es una energía que reside en el núcleo, sino una diferencia en la energía de masa entre un núcleo y la suma de sus nucleones.

La relación entre la energía nuclear de enlace y el número de masa A (suma de protones y neutrones) en ese núcleo es la energía de enlace por nucleón, ΔE_{EEN} :

$$\Delta E_{EEN} = \frac{\Delta E_{EE}}{A}$$

Se puede pensar en la energía de enlace por nucleón como la energía promedio necesaria para separar un núcleo en sus nucleones individuales. Una mayor energía de enlace por nucleón significa un núcleo más energéticamente unido.

En la figura 1 se muestra la energía de enlace por nucleón ΔE_{EEN} frente al número de masa A . Los núcleos que ocupan un lugar alto en el gráfico están fuertemente amarrados; es decir, se tendría que aportar una gran cantidad de energía para romper alguno de esos núcleos. Los núcleos que están más abajo en el gráfico, en los lados izquierdo y derecho, están débilmente amarrados y se necesitaría menos energía para separarlos.

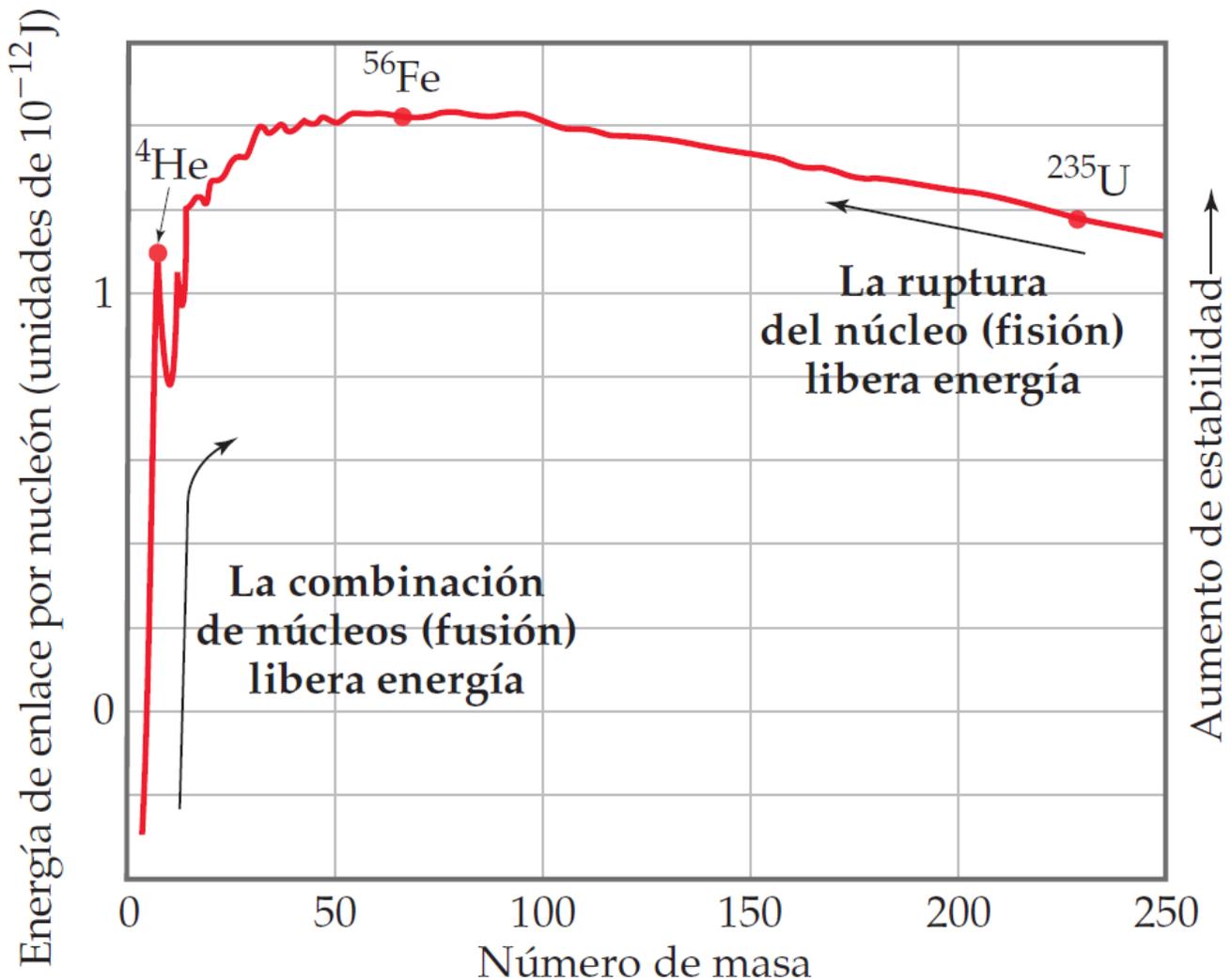


Figura 1. Energía de enlace por nucleón para algunos núcleos representativos (Brown, 2004)

Los núcleos grandes de la parte derecha del gráfico se pueden dividir en dos núcleos más ligeros y con una mayor energía de enlace por nucleón. Tal proceso, llamado fisión, ocurre naturalmente con núcleos grandes (de alto número de masa A) como el uranio, que pueden fisionarse espontáneamente (es decir, sin una causa externa o fuente de energía).

Los núcleos pequeños de la parte izquierda del gráfico se pueden combinar para formar un núcleo más grande y con una mayor energía de enlace por nucleón. Tal proceso, llamado fusión, ocurre naturalmente en las estrellas. De no ser así, el Sol no brillaría y, por lo tanto, la vida no podría existir en la Tierra.

Ambos procesos se esquematizan en la figura 2:

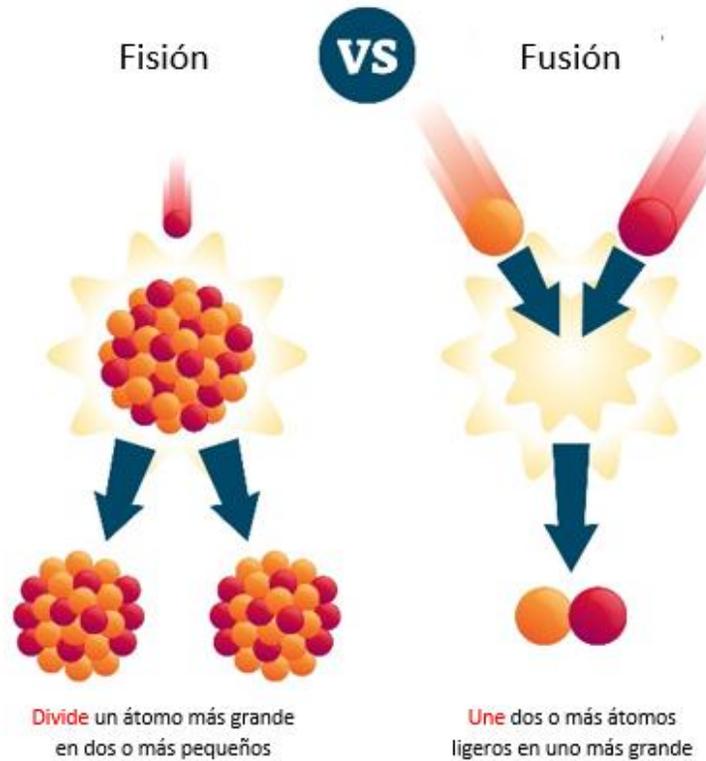


Figura 2. Esquema de la fisión y fusión nuclear. <https://www.tecnicasreunidas.es/es/articulo/nuevos-materiales-tecnologias-y-procesos-para-hacer-posible-el-uso-de-la-fusion-nuclear/>.

Resulta que la energía incrementa hacia los elementos más pesados hasta el hierro ($Z=26$). Más allá del hierro la energía de enlace comienza a decrecer. El hierro indica la máxima energía de enlace por nucleón posible, es decir, no hay núcleo con mayor amarre entre nucleones y, debido a que la combustión estelar hidrostática es un proceso de fusión nuclear, este límite en la energía de enlace por nucleón es el motivo por el cual el límite de síntesis de elementos es el hierro.

Estas reacciones generan una energía llamada normalmente como presión de radiación que es radialmente opuesta a la fuerza que es ejercida por la gravedad, para mantener a las estrellas en equilibrio hidrostático, es decir, cuando la estrella mantiene su radio constante. Es en este momento que se inician las reacciones nucleares ya que la temperatura del núcleo alcanza los millones de grados Kelvin.

Para la interpretación de estas reacciones se utilizará la simbología que se muestra en la Figura 3 y que explicamos a continuación.

Forma de representar un átomo de un elemento



- X Símbolo del elemento
- A Número de masa ($A = p + n$)
- Z Número atómico ($Z = p$)

Figura 3. Esquema de un núcleo y sus partes. <https://quimicaohsi.blogspot.com/2012/09/numero-atomico-masa-atmica-e-isotopos.html>

Los núcleos están formados por protones y neutrones, donde los protones son partículas con carga electrostática positiva, mientras que los neutrones no tienen carga. El número de protones en un núcleo (llamado número atómico) está representado por el símbolo Z, mientras que A es la suma del número de protones p y el número de neutrones n. Este número total de protones y neutrones es llamado el número de masa A. Los núcleos con el mismo número atómico Z, pero con diferente número de neutrones n son llamados isótopos. Cabe aclarar aquí que algunos isótopos son estables, mientras que otros son radioactivos. Sin embargo, estos últimos sufren un decaimiento (o desintegración) a través de la emisión de una partícula atómica, transformándose entonces en un núcleo más estable.

Los decaimientos más comunes son:

- a) **Decaimiento alfa.** Este decaimiento es cuando un núcleo se transforma en un núcleo diferente por la emisión de una partícula alfa (α) que es en realidad un núcleo de helio ${}^4\text{He}$ formado por dos protones y dos neutrones y que es muy estable.

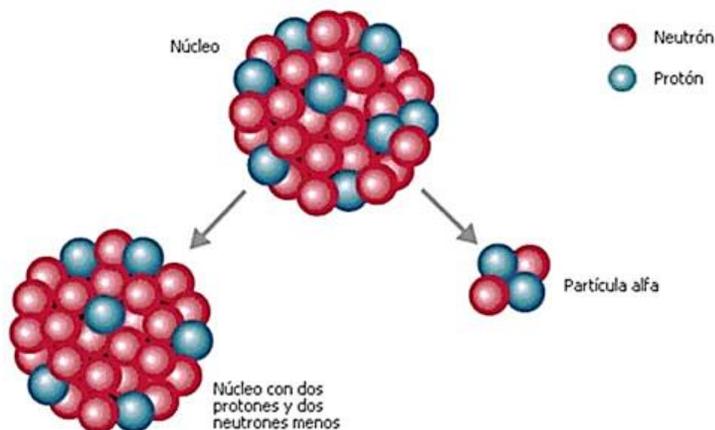


Figura 4. Esquema de un decaimiento alfa. <https://cumbrepuebloscop20.org/energias/nuclear/particula-alfa/>

b) **Decaimiento beta.** En este caso el núcleo decae espontáneamente, proceso en el que se emite un electrón o un positrón. Se dice que sufre un decaimiento beta negativo cuando se emite un electrón (e^-) y beta positivo cuando se emite un positrón (antipartícula del electrón, e^+). En un decaimiento beta negativo, un neutrón se transforma en un protón en el núcleo. En un decaimiento beta positivo, un protón se transforma en un neutrón.

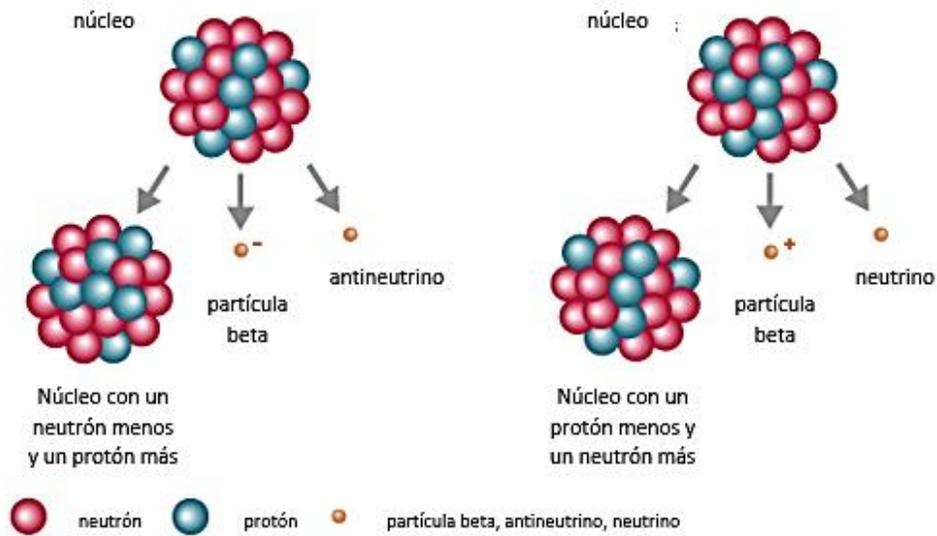


Figura 5. Esquema de un decaimiento beta negativo (izquierda) y positivo (derecha).
<https://robertochinchilla.wordpress.com/>

c) **Decaimiento gamma.** El decaimiento de rayos gamma (γ) ocurre cuando un núcleo se encuentra en un estado excitado y libera su exceso de energía a través de una radiación electromagnética, esto es, un fotón. Estos fotones gamma son de alta energía.

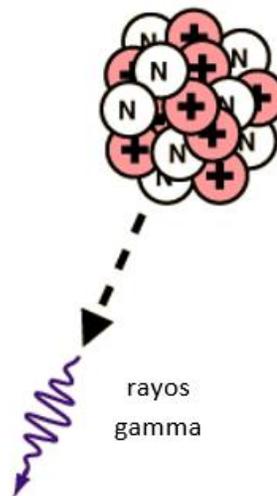


Figura 6. Esquema de un decaimiento gamma. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Nuclear/radact2.html>

Con estos conceptos bien definidos, se puede ahora dar paso a un estudio detallado de la nucleosíntesis.

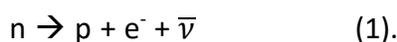
2. Nucleosíntesis primigenia

La teoría más aceptada con respecto al inicio del universo es la conocida como Big Bang. Este término, sin embargo, aunque inexacto, fue dado por Hoyle en una entrevista de radio en 1949 (véase Kragh, 2013). Esta teoría, no obstante, no habla exactamente del tiempo cero ya que su fundamento científico y matemático se basa en la relatividad general y, a tamaños tan pequeños y energías tan elevadas la relatividad general falla y tendría que ser reemplazada por otra teoría: la teoría de gravedad cuántica que aún no es la teoría definitiva de la unificación de las fuerzas.

Todo lo que se puede ver hoy en día, se conoce como *universo observable* y se debe considerar que si no se puede ver más lejos no es porque el universo se acabe en ese límite o porque se necesiten mejores telescopios. Este límite se debe, precisamente, a que el universo tuvo un principio. Dado que el universo como lo entendemos no existe desde siempre, lo más lejos que podemos ver es la distancia que ha podido recorrer la luz desde el Big Bang hasta la actualidad. Esta teoría surge de la observación del corrimiento al rojo de las galaxias (véase Cruz, 2020) y que implica que el universo está en expansión. En este modelo muy aceptado la temperatura y densidad del mismo universo va disminuyendo. Un modelo alternativo propuesto por Hoyle (1948) es el de la creación continua de materia. Sin embargo, este modelo no explica varias cuestiones observacionales por lo que la teoría del Big Bang es hoy en día la más aceptada. Profundizar más sobre estos temas se sale del tema de esta tesis, por lo que aquí simplemente describiremos las interacciones de las partículas cuánticas predichas en el inicio del Big Bang.

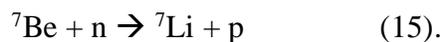
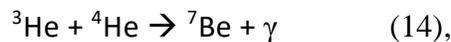
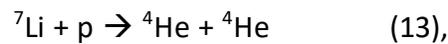
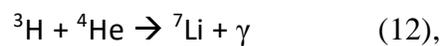
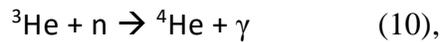
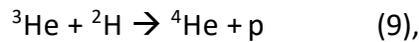
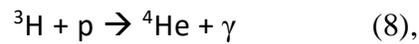
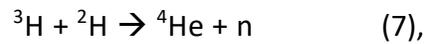
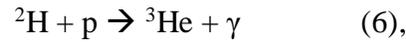
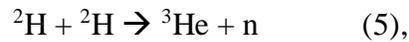
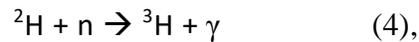
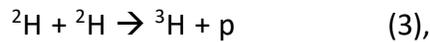
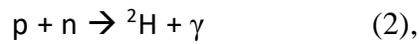
Si nos remontamos hasta 1 nanosegundo del inicio del universo, la materia estaba en forma de una *sopa* extremadamente caliente de partículas elementales. La teoría del Big Bang funciona bien a partir de este momento y, a la fecha, se asume que es correcta ya que hace predicciones que se han comprobado de manera observacional. Por ejemplo, a partir de este momento la teoría predice correctamente cuantos núcleos atómicos de cada tipo se formaron durante los 3 primeros minutos.

Un segundo después del inicio del Big Bang la temperatura es la suficiente para permitir la existencia de partículas fundamentales, entre ellas los protones, neutrones, electrones y fotones entre otras. En estas condiciones de temperatura y densidad estas partículas no pueden juntarse. Por ejemplo, los neutrones se desintegran en protones de acuerdo con la siguiente reacción:



El neutrón (n) se convierte en un protón (p) mediante un proceso de decaimiento beta negativo, en el que además se produce un electrón y un antineutrino ($\bar{\nu}$).

Sin embargo, el universo al seguirse enfriando permite que los protones y neutrones empiecen a fusionarse para dar origen a los primeros núcleos de deuterio y, conforme la temperatura disminuye se favorece la fusión de otros núcleos ligeros que dan origen a núcleos más pesados, como en los procesos que se muestran a continuación:



Como se puede observar, la mayoría de estas reacciones producen ${}^4\text{He}$, como lo son las reacciones (7), (8), (9), (10), (11) y (13). Este número de reacciones puede ser un factor por el cual el ${}^4\text{He}$ sea el segundo elemento más abundante del universo, siendo el primero el ${}^1\text{H}$ (un protón). La cantidad de ${}^4\text{He}$ primordial va entre el 24.19% y 24.87% (Arcones y Thielemann, 2023) de los elementos generados en esta nucleosíntesis primigenia y la cantidad de ${}^1\text{H}$ es de un 75% aproximadamente. El porcentaje faltante se suma en trazas de elementos como el ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ y ${}^7\text{Be}$, que están descritas en el resto de las reacciones anteriormente mencionadas.

En los aproximadamente 400 mil años posteriores al Big Bang, el universo es tan denso y caliente que los átomos no pueden existir como los conocemos hoy en día, es decir núcleos de protones y neutrones con sus respectivos electrones. En este momento del Big Bang los protones y electrones tienen tanta energía que sólo pueden existir como partículas libres en este plasma primigenio.

Los fotones presentes en la *sopa* primigenia interactúan con estos protones y electrones siendo absorbidos y reemitidos constantemente. Al expandirse el universo, la temperatura y la densidad disminuyen rápidamente con el tiempo y en consecuencia las partículas cuánticas pierden energía, lo que permite la formación de los primeros átomos como los conocemos hoy en día. A esta época se le conoce como recombinación, que consiste en el acoplamiento o amarre de los electrones con los protones. En estas condiciones los fotones se desacoplan de este proceso inicial lo que permite que los fotones puedan recorrer el espacio en una forma más libre.

El universo primitivo lucía igual en todos lados (es decir, era homogéneo) y, cuando la luz pudo ser liberada aproximadamente 400 mil años después del Big Bang, esta luz se ha podido detectar en lo que se conoce como el fondo cósmico de microondas. Se conoce como fondo porque no hay una luz detrás y microondas debido a que la luz ha viajado durante tanto tiempo que la expansión del universo le ha robado mucha energía hasta dejarla con una longitud de onda que está en las microondas, equivalente a 3 grados Kelvin.

2.1 Estrellas primigenias y Diagrama H-R

Como se ha mencionado, el Universo está en proceso de expansión, sin embargo, existen regiones que por atracción gravitacional se compactan lo que genera heterogeneidades en el universo. Dicho de otra manera, el universo después del proceso de recombinación se vuelve heterogéneo. Pasados unos cientos de millones de años del Big Bang, en estas regiones gaseosas más densas se comienzan a formar las primeras estrellas.

Estas estrellas debieron ser muy distintas a las que ahora existen porque se formaron del gas original compuesto por los átomos de la nucleosíntesis primigenia, es decir, prácticamente hidrógeno y helio en su totalidad. Se teoriza que fueron estrellas muy masivas que, al contraerse lo suficiente para lograr una temperatura adecuada para las primeras reacciones termonucleares, los átomos primigenios de hidrógeno y helio se fueron fusionando para formar carbono, nitrógeno, oxígeno y los otros elementos químicos que ahora conocemos. Al momento de *morir* estas estrellas, explotan y lanzan al espacio los elementos químicos sintetizados dentro de ellas. Ya en el espacio, el gas expulsado en estas explosiones se mezcla con gas existente, se vuelve a contraer por efecto gravitacional, de modo que las siguientes generaciones de estrellas se forman de un *gas enriquecido* con elementos químicos diversos. A estas explosiones se les conoce como supernovas (Rodríguez, 2008), se hablará más acerca de ellas en el capítulo 4.2.

A lo largo de este trabajo de tesis se hablará en detalle y profundidad sobre cómo se sintetizan los diversos elementos de la tabla periódica hasta el uranio. Sin embargo, se debe explicar los tipos de estrella donde pueden llevarse a cabo ciertos procesos con mayor o menor facilidad. Para ello haremos uso de una herramienta astronómica muy utilizada conocida como el Diagrama Hertzsprung-Russell o Diagrama H-R que se muestra a continuación:

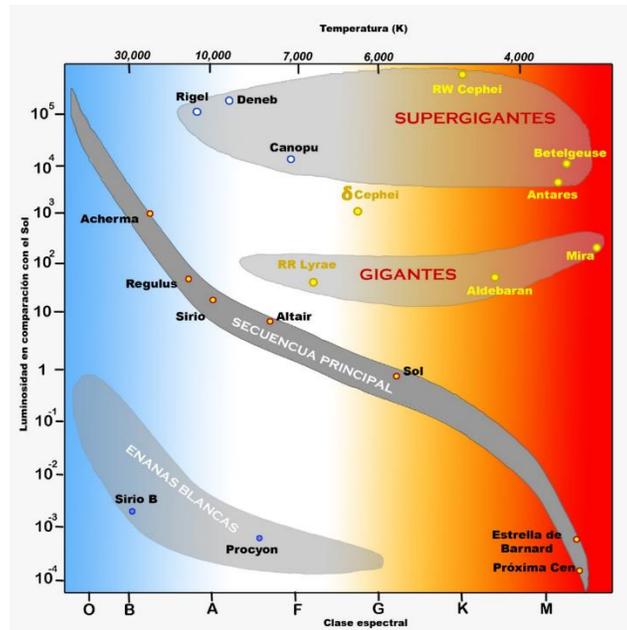


Figura 7. Diagrama H-R. Tomado de https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution_hrintro.html. Editado por la Lic. Tania Gabriela Zaldívar Arellano.

Este diagrama tiene como parámetros la clase espectral, la luminosidad comparada al Sol y la temperatura. La clase espectral se refiere a una clasificación utilizada en astronomía y se dividen de la siguiente forma:

| Clase | Temperatura (K) | Color | Masa de secuencia principal (M_{\odot} = 1 masa solar) |
|-------|-----------------|-------|---|
| O | ≥ 30000 | | ≥ 16 |
| B | 30000-10000 | | 2.1-16 |
| A | 7500-10000 | | 1.4-2.1 |
| F | 6000-7500 | | 1.04-1.4 |
| G | 5200-6000 | | 0.8-1.04 |
| K | 3700-5200 | | 0.45-0.8 |
| M | 2400-3700 | | 0.08-0.45 |

Tabla 1. Parámetros de la clasificación por clase espectral.

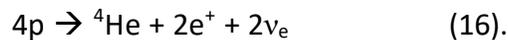
Esta clasificación estelar (Baraffe et al. 2003, Habetts & Heinze, 1981) nos ayuda a conocer las distintas estrellas que pueden existir en el universo y sus distintas propiedades físicas y químicas, en particular la temperatura y la masa son esenciales debido a que muchas reacciones de nucleosíntesis que ocurren en su interior dependen de estos mismos parámetros. Adicionalmente, la franja de color gris que se muestra en el diagrama denominada secuencia principal es donde están la mayoría de las estrellas, esto se debe a que las estrellas se quedan el 90% de sus vidas en esta misma fase.

Generalmente la nucleosíntesis estelar es la de mayor relevancia al momento de estudiar estos procesos de fusión nuclear ya que la mayoría de los elementos son sintetizados en las estrellas.

3. Combustión estelar hidrostática

3.1 Combustión de hidrógeno

Las reacciones nucleares de fusión, que se les llama usualmente quemado nuclear, comienzan por la combustión de hidrógeno en helio que genera energía. Estas reacciones inician a partir de 10×10^6 K (Rauscher, 2020) y la reacción global es la siguiente:



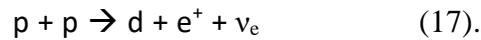
Esta reacción simple, sin embargo, no tiene mucha probabilidad de darse en los centros estelares debido a que la probabilidad de que cuatro protones interactúen al mismo tiempo es muy baja. Afortunadamente esta reacción puede llevarse a cabo en una cadena de reacciones que involucran tan solo dos protones y sus respectivos decaimientos. (La probabilidad de que dos protones puedan amarrarse es de 1.8×10^{-7} , sin embargo, en el Sol esta probabilidad aumenta en un factor de 5200 (Shaviv, 2012)).

Los dos positrones son inmediatamente convertidos en fotones por aniquilación electrón-positrón que se da con los electrones libres en el plasma estelar, dando una energía total de reacción igual a $Q_{nuc}^{H-\text{quemado}} = 26.731$ MeV (Rauscher, 2020). Así mismo, en esta reacción se producen dos neutrinos (véase capítulo 2.1.2).

A continuación, se discuten los dos mecanismos mediante los cuales se lleva a cabo dicha conversión de hidrógeno en helio.

3.1.1 Cadenas pp

Las cadenas protón-protón (pp) son uno de los mecanismos mediante el cual se lleva a cabo la conversión de hidrógeno en helio. Estas cadenas inician con la siguiente reacción:



La reacción (17) consiste en la interacción entre dos protones y tiene un valor de energía Q igual a $Q_{\text{nuc}} = 0.42$ MeV. Sin embargo, la liberación total de energía es de 1.442 MeV debido a la aniquilación del positrón con un electrón del plasma estelar lo que produce 1.022 MeV de energía adicionales en forma de fotones. Sin embargo, hay una probabilidad alta de que uno de los dos protones sufra un decaimiento β^+ , es decir una conversión de protón a neutrón. Este último no tiene carga electrostática y se amarra al segundo protón por las fuerzas nucleares fuertes que son de atracción. De esta forma la reacción (17) termina con un deuterio (un núcleo compuesto por un protón y un neutrón, ${}^2\text{H}$ o d) y un neutrino.

La reacción (17) es la más lenta de todas con un tiempo de vida media igual a 7.9×10^9 años. Debido a que el tiempo para completar una secuencia de reacción está determinada por la reacción más lenta, esta reacción determina la escala de tiempo para el consumo de protones. Por lo tanto, determina la escala de tiempo de la estrella (el tiempo que pasa en la secuencia principal). Aunque cada protón en el interior estelar tiene una vida media de 10^{10} años, la considerable cantidad de energía liberada es posible debido a la enorme cantidad de protones en el volumen donde el quemado de hidrógeno sucede.

Otra forma de producir deuterio en la etapa inicial de las cadenas pp es la reacción pep, que implica la conversión de un protón a un neutrón mediante una captura electrónica:



La reacción pep produce una energía de $Q_{\text{nuc}} = 1.44$ MeV. Sin embargo, solo el 0.23% de los deuterios son producidos (en condiciones solares) por esta reacción. Esto se explica debido a dos factores, siendo el primero la baja probabilidad de que ocurra esta reacción ya que es una reacción simultánea entre tres cuerpos. El segundo factor es su tiempo de vida media (3.7×10^{12} años), (Arcones y Thielemann, 2023), que es mayor al de la reacción (17), por lo que es más habitual la reacción (17) que la (18). Al ocurrir de manera tan poco frecuente, la aportación energética de la reacción pep al equilibrio hidrostático se podría considerar despreciable.

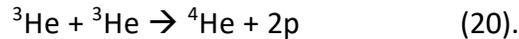
Una vez formado el deuterio, éste captura otro protón para formar un núcleo de ${}^3\text{He}$ como se muestra en la siguiente reacción:



La reacción (19) es muy rápida comparada con la reacción (17) ya que tiene un tiempo de vida media igual a 4.4×10^{-8} años (Rauscher, 2020). Así, el deuterio pasa a ser un intermediario en las cadenas ya que si comparamos el tiempo de vida media de la reacción (17) con el tiempo de vida de esta reacción, se puede denotar que el deuterio producido en (17) y (18) es consumido de manera prácticamente instantánea y, por ello, la abundancia de deuterio es muy pequeña dentro de las estrellas. Así mismo, la energía liberada de la reacción (19) es de 5.493 MeV.

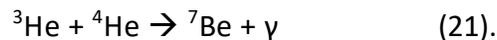
Después de la producción de ${}^3\text{He}$ en la reacción (19), se abren 3 posibles caminos de reacción. Estos se conocen como cadenas pp-I, cadenas pp-II y cadenas pp-III y cada una concluye con la generación de una partícula alfa.

La cadena pp-I es la de mayor probabilidad (85%). Cabe destacar que, para completar esta cadena, las reacciones (17) y (19) deben ocurrir dos veces para producir los dos ${}^3\text{He}$ requeridos:



En la reacción (20), como se mencionó, dos núcleos de ${}^3\text{He}$ interactúan y forman una partícula alfa y dos protones. Esta cadena libera una energía igual a 12.859 MeV y tiene un tiempo de vida media igual a 2.4×10^5 años. Cabe resaltar que, en algunas reacciones, como la reacción (20), existe un isótopo intermediario, en este caso particular el ${}^6\text{Be}$, sin embargo, no se escriben debido a que no se consideran relevantes por su tiempo de vida media, en el caso de este isótopo, siendo de 5×10^{-21} s.

Otro camino de reacción que tiene el núcleo de ${}^3\text{He}$ es una interacción con un núcleo ya formado de ${}^4\text{He}$ para formar un isótopo de berilio. Es decir:



La reacción (21) tiene un 15% de probabilidad, esto porque hay que destacar que requiere la presencia de ${}^4\text{He}$, ya sea inicialmente contenido en el plasma estelar o producido en la cadena pp-I. La reacción (21) tiene un tiempo de vida media de 9.7×10^5 años y una energía en forma de rayos gamma de 1.586 MeV.

A partir de la reacción (21) se desprenden las dos cadenas restantes. La cadena pp-II se conforma de las siguientes reacciones:



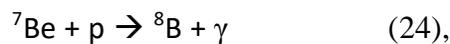
donde el ${}^7\text{Be}$ captura un electrón del plasma estelar y, al hacerlo, se produce un decaimiento al ${}^7\text{Li}$ con la liberación de un neutrino. Esta reacción tiene un tiempo de vida media de 3.9×10^{-1} años y libera una energía igual a 0.861 MeV.

Posteriormente, el ${}^7\text{Li}$ captura un protón, lo que en principio produce ${}^8\text{Be}$, sin embargo, este es inestable y rápidamente se rompe, formando dos partículas alfa:



Esta reacción tiene un tiempo de vida media de 1.8×10^{-5} años y libera una energía igual a 17.347 MeV.

La cadena pp-III se produce si el ${}^7\text{Be}$ captura un protón en lugar de un electrón:



para formar ${}^8\text{B}$. Esta reacción tiene un tiempo de vida media de 6.6×10^1 años y libera una energía en forma de rayos gamma igual a 0.135 MeV. Una vez formado el ${}^8\text{B}$, este decae en ${}^8\text{Be}$, emitiendo un positrón y un neutrino:



Como se mencionó, ${}^8\text{Be}$ es también inestable, y se rompe en dos partículas alfa:



Estos dos decaimientos tienen una vida media de 3×10^{-8} años, valor muy corto debido a la inestabilidad del ${}^8\text{B}$ y el ${}^8\text{Be}$. La cadena pp-III genera una energía total de 18.078 MeV.

La cadena pp-II tiene un 99.9% de probabilidad de ocurrir con respecto a la cadena pp-III. Esto dentro del 15% de probabilidad de la reacción (21), es decir, de manera global la cadena pp-I tiene una probabilidad del 85% de ocurrir, la cadena pp-II tiene un 14.9% y la cadena pp-III tiene un 0.1% de ocurrir.

De manera general podemos organizar las cadenas pp de la siguiente manera:

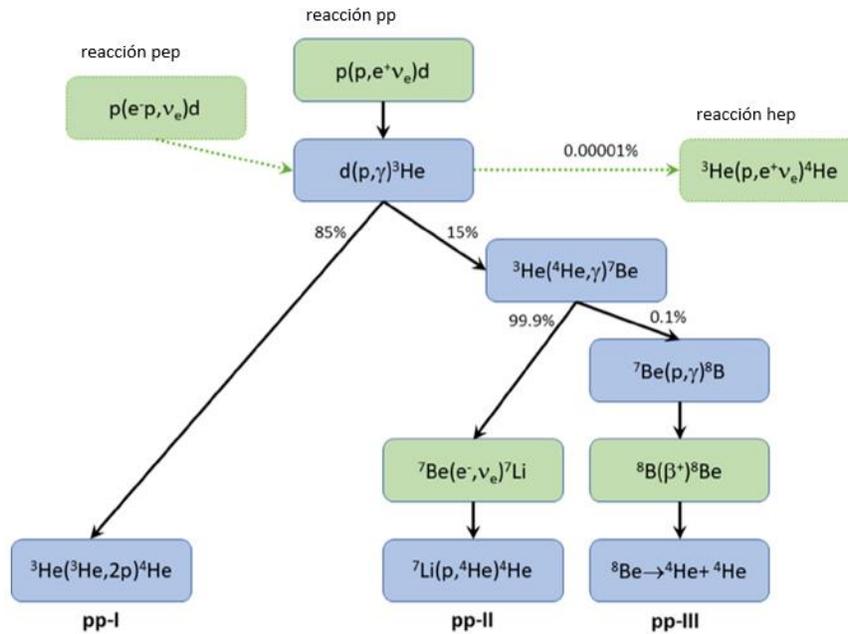


Figura 8. Diagrama de las cadenas pp. (Rauscher, 2020)

La notación utilizada en este diagrama se puede interpretar como los reactivos previos a la coma y los productos después de la misma. Por ejemplo, $d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$, en esta notación se escribiría de la siguiente manera: $d(p,\gamma){}^3\text{He}$

Cabe destacar que este conjunto de reacciones es dependiente de la temperatura. Un ejemplo de esta dependencia con la temperatura se puede ejemplificar con las reacciones que involucran al ${}^7\text{Be}$. Si la temperatura dentro de una estrella es muy alta, por ejemplo, es muy probable que un electrón libre del plasma sea capturado. Esto altera significativamente la velocidad de reacción, y así, el tiempo de vida media del ${}^7\text{Be}$ es mayor en condiciones solares ($T=15 \times 10^6 \text{ K}$, $\rho=150 \text{ g cm}^{-3}$) con respecto al tiempo de vida media medido en un laboratorio (140 días a comparación de los 77 días en condiciones terrestres).

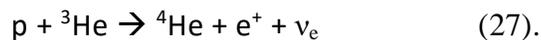
El dominio de la temperatura en cada cadena es tal que existe un rango de temperatura donde una cadena predomina sobre las demás:

$10 \leq T \leq 14 \times 10^6 \text{ K}$ cadena pp-I (dominante)

$14 \leq T \leq 23 \times 10^6 \text{ K}$ cadena pp-II (dominante)

$T > 23 \times 10^6 \text{ K}$ cadena pp-III (dominante).

Hay que aclarar que de manera teórica es posible que se efectúe una reacción directa del ${}^4\text{He}$ y del ${}^3\text{He}$ en una reacción que se denomina reacción-hep:



Sin embargo, hasta ahora, de esta reacción no se han detectado neutrinos en el Sol.

3.1.2 Neutrinos

Se ha mencionado varias veces a la partícula *neutrino* o se ha indicado la existencia de los *antineutrinos* en, por ejemplo, el decaimiento beta (figura 5). No obstante, aún no se han especificado sus características y propiedades o su aportación a las reacciones donde se presentan.

El primero en proponer la existencia de estas partículas fue Wolfgang Pauli (1930). Las implicaciones cosmológicas de la física de neutrinos fueron consideradas por primera vez en un artículo de Alpher et al. (1953).

El neutrino, ν , es una partícula sin carga. Los cálculos modernos muestran que los neutrinos tienen una masa muy pequeña que es emitida desde el núcleo junto con un positrón o un electrón durante un proceso de decaimiento. Los neutrinos interactúan muy débilmente con la materia y por esta razón resulta muy difícil de detectar y por mucho tiempo pasaron desapercibidos (Walker, 2014), sin embargo, a pesar de su carácter elusivo, los neutrinos pudieron ser detectados en el laboratorio. Esto fue realizado por primera vez por Reines y Cowan (1953). A raíz de este acontecimiento se han podido detectar los neutrinos provenientes del Sol, siendo este de 5.6×10^{10} neutrinos/cm² por segundo (Rauscher, 2020). Estos neutrinos han sido encontrados mediante detectores radioquímicos que utilizan diversos fundamentos físicos con tecnologías distintas (García, 2016). Los neutrinos poseen una energía específica para cada reacción por lo que, al ser detectados, se puede conocer la procedencia de estos.

Actualmente se ha establecido que existen al menos tres tipos de neutrinos: electrónicos (ν_e), muónicos (ν_μ) y tauónicos (ν_τ) y sus respectivas antipartículas (Dolgov, 2002). Esta partícula es la más abundante en el universo y ha estado presente desde el inicio de este (véase capítulo 4).

En general se procuran estudiar sistemas cerrados, es decir, sistemas en los que sus parámetros físicos se conservan. Por ejemplo, al estudiar una reacción química se postula el concepto de conservación de la energía, donde se establece que debe existir un equilibrio energético en la reacción. En general, en cualquier proceso físico o químico la masa es constante ya que la materia no se crea o destruye, se transforma. Además de la conservación de estos parámetros, la energía y la masa, existe también la conservación del momento angular. Es también una ley de conservación que debe cumplirse de forma que el momento angular neto en algún punto inicial del tiempo t_i debe ser igual al momento angular neto en algún punto posterior en el tiempo t_f . Así como

se ha mencionado que se libera energía en forma de fotones, y que esta se rige por la conservación de la energía, asimismo los neutrinos aportan a la conservación del momento angular en las reacciones de nucleosíntesis (Langacker et al., 1983). Esta aportación requiere de estudios ajenos al propósito de esta tesis, por lo que no se profundizará en ellos.

3.1.3 Ciclos CNO

El ciclo alternativo CNO de quema de hidrógeno actúa si ya están presentes núcleos de C, N u O y, además se da a temperaturas más altas que las cadenas pp debido a que estas temperaturas mayores hacen posible superar las barreras de Coulomb de estos núcleos más pesados (Arcones y Thielemann, 2023).

Esta barrera de Coulomb es mayor que la mencionada para la fusión entre dos protones, 550 keV (Walker, 2014), por lo que la dependencia a la temperatura es mayor que en las cadenas pp. Siendo más exactos, la dependencia de las cadenas pp es de T^4 , mientras que la dependencia del ciclo CNO es de T^{18} . Dicho de otra manera, las cadenas pp pueden darse a partir de 10 MK mientras que el ciclo CNO se da a partir de 15×10^6 K (Wiescher, et al., 2010).

Hay que hacer notar que las estrellas de baja masa con $M \leq 1.5 M_{\odot}$ queman combustible principalmente por las cadenas pp y una pequeña fracción mediante los ciclos CNO. Para el caso de estrellas más masivas con $M \geq 1.5 M_{\odot}$ logran su estabilidad principalmente mediante los ciclos CNO.

Este ciclo CNO es en realidad un conjunto de secuencias catalíticas que tiene varias ramas dependiendo de la temperatura. Para una mejor comprensión, se hará uso de un esquema que se explicará detalladamente a continuación y, cabe aclarar que el lector deberá regresar continuamente a este diagrama para tener un mejor seguimiento de todas las reacciones que se muestran a continuación:

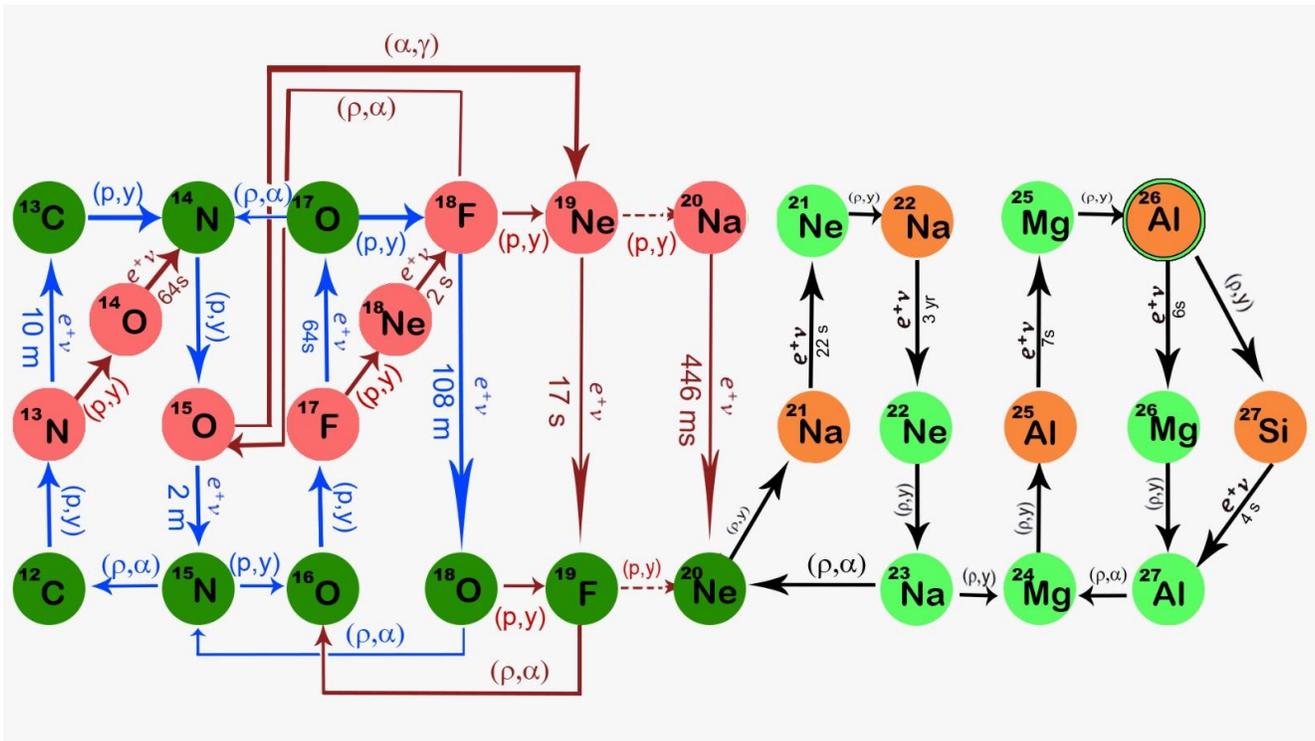
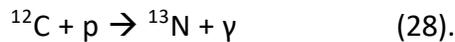


Figura 9. Diagrama de los ciclos CNO fríos representados en azul, y de los ciclos CNO calientes mostrados aquí en rojo. De lado derecho los ciclos NeNa y MgAl. Tomado de Wiescher et al., 2010 y Boeltzig et al., 2016. Editado por la Lic. Tania Gabriela Zaldívar Arellano.

En la figura 9, las flechas azules indican los ciclos que se dan a temperaturas de aproximadamente 15×10^6 K y que son conocidos como ciclos CNO fríos, mientras que las flechas rojas indican los ciclos o ramificaciones que se dan a temperaturas de aproximadamente 10^8 K y que son denominados ciclos CNO calientes.

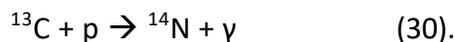
Si empezamos la descripción del ciclo a partir del ^{12}C tenemos la siguiente cadena. El ^{12}C captura un protón de los muchos disponibles en el núcleo estelar, dando como producto rayos gamma más un núcleo inestable de ^{13}N . El tiempo de vida media de esta reacción es de 6×10^9 años.



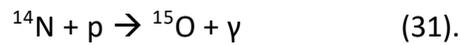
Posteriormente, el ^{13}N inestable, decae espontáneamente a ^{13}C liberando un positrón y un neutrino. El tiempo de vida media de esta reacción es de 10 minutos.



El ^{13}C es estable y tiene la posibilidad de capturar otro protón formando un núcleo estable de ^{14}N . El tiempo de vida media de la reacción es de 10^9 años.



El núcleo de ^{14}N formado en la reacción (30), al ser estable, puede capturar un protón para darnos como producto un núcleo inestable de ^{15}O y rayos gamma.



Esta reacción es la más lenta del ciclo CNO y por ello determina la escala temporal de la combustión. Por lo tanto, cualquier abundancia inicial de otros núcleos se transforma en ^{14}N , momento en el cual la continuación del ciclo tiene que esperar hasta que ocurra la captura de protones. El tiempo de vida de esta reacción es de 2×10^{12} años.

Este ^{15}O decae en un núcleo estable de nitrógeno, el ^{15}N . Se libera un positrón y un neutrino. El tiempo de vida de la reacción es de 2 minutos.

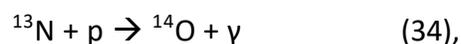


Por último, en este primer ciclo, regresamos a nuestro reactivo inicial y por ello se dice que son secuencias catalíticas. El ^{15}N captura un protón y se divide en una partícula alfa y el ^{12}C inicial, siendo este el catalizador de la reacción. El tiempo de vida es de 10^8 años.



Este ciclo es conocido como el ciclo CNO-I o ciclo CN y es el de mayor dominancia debido a la reacción (31) ya que, al ser la de mayor tiempo de vida media, la abundancia de ^{14}N debe ser la mayor. Y sin este nitrógeno, ninguno de los elementos más pesados puede ser sintetizado, por lo que el resto de los ciclos dependen de este ciclo CN.

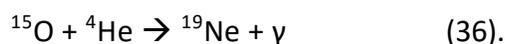
A partir del ^{13}N , si la temperatura es lo suficientemente alta, captura un protón y da lugar a ^{14}O de la siguiente manera:



y, el ^{14}O decae a ^{14}N con un tiempo de vida media de 64 s:



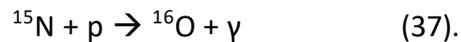
El isótopo de oxígeno generado en la reacción (31) en condiciones más altas de temperatura puede seguir otro camino de reacción en donde logra capturar una partícula alfa antes de poder decaer y así formar ^{19}Ne y liberación de rayos gamma:



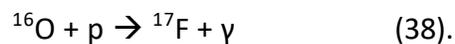
Esto da paso a lo que se conoce como ciclos CNO calientes por su requerimiento de una temperatura mayor para que se efectúen, sin embargo, dichos ciclos se retomarán más adelante.

De este ciclo dominante CN o CNO-I, se abre una ramificación en ^{15}N , a otra cadena de reacciones que son conocidas como ciclo CNO-II.

El ciclo CNO-II, como se dijo, parte del ^{15}N que captura un protón formando ^{16}O y libera rayos gamma:



Este núcleo estable de ^{16}O captura otro protón y genera un núcleo inestable de flúor. Cabe destacar, que a pesar de que en este segundo ciclo se puede generar un núcleo de flúor, se conocen como ciclos CNO ya que éste ^{17}F , a comparación de los núcleos estables de C, N y O, tiene un tiempo de vida corto:



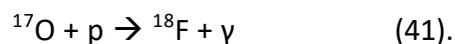
Como se mencionó, el flúor inestable decae rápidamente con un tiempo de vida media de 64 segundos mediante un decaimiento beta positivo formando ^{17}O y liberando un positrón y un neutrino.



Finalmente, este ciclo CNO-II termina cuando el ^{17}O captura un protón y se separa en dos núcleos, el ^{14}N y una partícula alfa:



El ciclo CNO-III parte de una ramificación del ciclo CNO-II, empezando en el ^{17}O que captura un protón y, en lugar de partirse en dos núcleos, forma ^{18}F :



Este flúor se descompone rápidamente con un tiempo de vida media de 108 minutos para dar paso a un núcleo de oxígeno, el ^{18}O :



Finalmente, este ciclo CNO-III termina cuando el ^{18}O captura un protón y esto resulta en la formación de dos núcleos estables, ^{15}N y una partícula alfa.



Este es el final de los ciclos CNO fríos que abarcan los ciclos CNO-I, CNO-II y CNO-III.

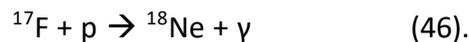
Como se mencionó anteriormente, la reacción (36) da paso a lo que se conoce como ciclos CNO calientes. Veamos ahora estos ciclos. De esta reacción (36) el ^{19}Ne puede decaer y dar lugar a ^{19}F , liberando un positrón y un neutrino. Esta reacción tiene un tiempo de vida media de 17 segundos.



Este isótopo de flúor, ^{19}F , es el primer flúor estable que es sintetizado en los ciclos CNO. A partir de aquí hay dos caminos posibles. El primero consiste en la captura de un protón que en principio formaría un núcleo de ^{20}Ne . Sin embargo, es más viable que se produzca una ruptura en la que obtienen un núcleo de ^{16}O y una partícula alfa:



Si nos fijamos en la figura 9, la reacción (38) es necesaria para producir el ^{17}F y, a partir de este núcleo, se toma otro camino distinto de la reacción (39) la cual es una *reacción fría*. En este caso, para temperaturas manejadas en los ciclos CNO calientes, el ^{17}F puede capturar un protón para generar ^{18}Ne con la emisión de rayos gamma:



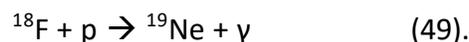
Al igual que el neón de la reacción (44), este sufre un decaimiento β^+ dando como producto ^{18}F y las respectivas partículas de este decaimiento. Es una reacción muy rápida con tiempo de vida media de 2s.



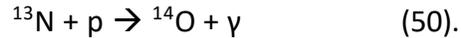
El ^{18}F puede capturar un protón y tomar dos caminos distintos. En el primero, el ^{18}F captura un protón y como en el caso de la reacción (45), el núcleo se rompe en ^{15}O más una partícula alfa, regresando al reactivo inicial, pero habiendo generado dos partículas alfa en total.



En el segundo caso, flúor captura el protón, pero el núcleo no se rompe. Esto da lugar a un núcleo de ^{19}Ne y radiación gamma y podríamos volver a la reacción (44).



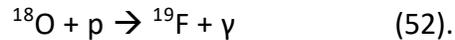
Adicionalmente tenemos un par de reacciones que varían con respecto a los CNO fríos. A partir del ^{13}N generado en la reacción (28) debido a la alta temperatura se da una ruta distinta. Aquí el nitrógeno no decae, sino que captura un protón y da lugar a ^{14}O de la siguiente manera:



Con un tiempo de vida media de 64 s, ^{14}O decae a ^{14}N :

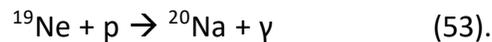


El ^{18}O generado en la reacción (42) también puede tener un camino distinto. Al capturar un protón, en la reacción (43) se produce una *reacción fría*, sin embargo, debido a la alta temperatura, al capturar este protón el ^{18}O no se rompe, sino que da lugar al ^{19}F .

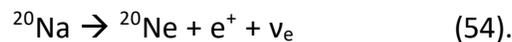


Finalmente, tenemos dos caminos que, si bien forman parte de los ciclos CNO, podríamos considerarlos la culminación de éstos. Esto debido a que ya no se trata de un proceso catalítico en el que regresemos a los mismos reactivos. Estas reacciones son posibles a temperaturas superiores a 4×10^8 K.

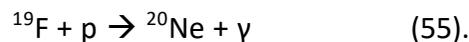
El primero sucede a partir del ^{19}Ne producido en las reacciones (36) y (49) mediante la captura de un protón que da lugar a un isótopo de sodio inestable, ^{20}Na .



Posteriormente ^{20}Na sufre un decaimiento β , produciendo ^{20}Ne estable.



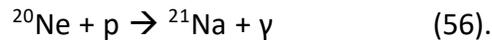
El segundo camino consta de una captura de protón por parte del ^{19}F que fue producido a partir de las reacciones (44) y (52). El flúor a diferencia de la reacción (45), no se rompe al ocurrir la captura, sino que este núcleo aumenta su número atómico formando ^{20}Ne al igual que en la reacción (36).



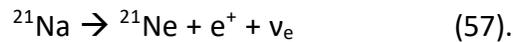
Como podemos notar en la figura 9 el ^{20}Ne es la terminación de los ciclos CNO, ya que ninguna flecha regresa a formar reactivos y por lo tanto el núcleo estable de neón continuará produciendo otros núcleos distintos a carbono, oxígeno y nitrógeno.

Posteriormente a los ciclos CNO, cuando el isótopo de ^{20}Ne es producido en las reacciones (54) y (55), se abre la posibilidad a nuevos ciclos de quemado de hidrógeno. Estos ciclos son conocidos como ciclos Ne-Na y Mg-Al y comienzan aproximadamente a los $60\text{-}100 \times 10^8$ K.

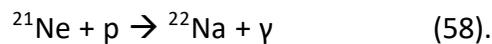
El ciclo Ne-Na consiste en una secuencia catalítica con capturas de protones y desintegraciones de isótopos de Na y Ne que generan como producto partículas alfa. Comienza con el isótopo de ^{20}Ne sintetizado previamente, que captura un protón para formar un núcleo inestable de ^{21}Na y energía.



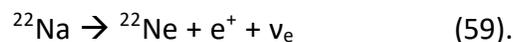
El núcleo de sodio anterior sufre un decaimiento beta con tiempo de vida media de 10 m, liberando un positrón y un neutrino, así como un núcleo estable de ^{21}Ne .



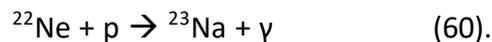
El neón captura un protón y esto genera un núcleo inestable de ^{22}Na y rayos gamma.



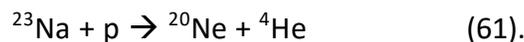
Este ^{22}Na decae a ^{22}Ne estable, liberando las partículas correspondientes al decaimiento beta positivo. El tiempo de vida media de esta reacción es de 3 años



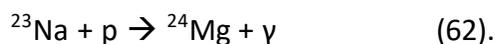
Como en el resto del ciclo, neón vuelve a aumentar su número atómico mediante la captura de un protón. Los productos son ^{23}Na más fotones.



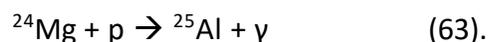
Finalmente, el ^{23}Na de la reacción (43) captura un protón y se rompe en ^{20}Ne , que era el reactivo inicial, más una partícula alfa.



Por otro lado, es posible la síntesis de magnesio y aluminio mediante el ciclo Mg-Al. Este ciclo comienza a partir del ^{24}Mg producido mediante la captura de un protón por parte del ^{23}Na de la reacción (60).



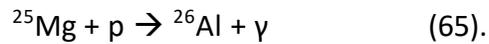
El ^{24}Mg captura un protón para producir el primer isótopo de aluminio en la quema de hidrógeno.



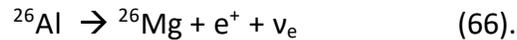
El isótopo de aluminio de la reacción (63) es transformado espontáneamente en ^{25}Mg debido al decaimiento beta que sufre. El tiempo de vida media de esta reacción es de 7 s.



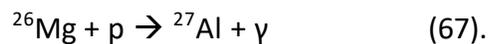
El ^{25}Mg que es estable, captura un protón para formar nuevamente un isótopo de aluminio y liberar energía.



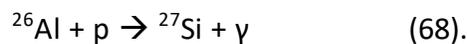
El ^{26}Al puede descomponerse mediante un decaimiento β^+ y dar como producto ^{26}Mg , con tiempo de vida media de 6s.



Casi para concluir el ciclo, ^{26}Mg captura un protón para generar otro isótopo estable de aluminio y liberando rayos gamma.



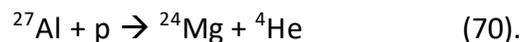
Adicionalmente al camino que se acaba de mencionar, hay otra forma de sintetizar el ^{27}Al anterior. A partir del ^{26}Al generado en la reacción (65), es posible la captura de un protón por parte de este isótopo de aluminio para la formación del primer núcleo de silicio.



Sin embargo, este silicio no dura mucho tiempo en el medio, ya que tiene un tiempo de vida media de 4 s, por lo que decae rápidamente al ^{27}Al que también es sintetizado en la reacción (67).



Finalmente, para el ciclo Mg-Al se concluye con la captura de un protón por parte del ^{27}Al que se rompe en un núcleo de ^4He y vuelve al reactivo inicial ^{24}Mg .



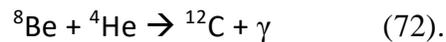
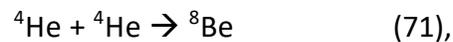
3.2 Combustión de helio y elementos diversos hasta el hierro

Con el agotamiento del hidrógeno en el núcleo estelar, la quema de hidrógeno continúa en una cáscara externa. Al mismo tiempo el núcleo agotado en hidrógeno se contrae gravitacionalmente provocando ahora un nuevo aumento en su densidad ($10^5 - 10^8 \text{ kg m}^{-3}$) y en su temperatura (10^8 K). Esta contracción se detiene cuando la temperatura es suficientemente alta como para iniciar con la fusión de helio en carbono y que será la nueva fuente de energía que funcionará ahora como la nueva presión de radiación. Esta fusión o quema de helio se desencadena a través del proceso triple alfa y tiene como consecuencia la producción de ^{12}C . Este es un proceso que requiere condiciones bastante estrictas (deBoer et. al, 2017). Tenemos entonces en esta etapa dos procesos

que son la conversión de hidrógeno en helio en la cáscara externa y además la producción de helio en carbono en un nuevo núcleo que vuelve a permitir el equilibrio hidrostático. Este proceso se describe en detalle a continuación.

3.2.1 Proceso triple alfa y captura de partículas alfa

Como resultado de las reacciones iniciales de conversión de hidrógeno en helio a través de las cadenas pp y los ciclos CNO, la abundancia de ${}^4\text{He}$ en el núcleo estelar ahora ha aumentado. Es decir, tenemos en este nuevo núcleo más ${}^4\text{He}$ que al inicio. A una temperatura por arriba de los 10^8 K (Rauscher, 2020) el ${}^4\text{He}$ puede ser transformado en carbono en la reacción triple alfa, que se compone por las siguientes dos reacciones:



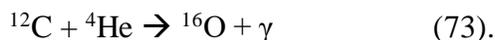
Estas dos reacciones tienen un valor de energía neto de $Q = 7.5$ MeV (Arcones y Theilemann, 2023). Estas dos reacciones si se dan una tras de la otra daría como resultado un núcleo de ${}^{12}\text{C}$. Las mostramos así ya que el ${}^8\text{Be}$, es un núcleo con una vida extremadamente corta, pues es muy probable que este ${}^8\text{Be}$ capture una partícula alfa y se convierta en un núcleo de ${}^{12}\text{C}$ y se emitan rayos gamma.

La reacción (71) es una reacción endotérmica con $Q = -92$ KeV (Rauscher, 2020). La cantidad de ${}^8\text{Be}$ es 5.2×10^{-10} veces menor que el ${}^4\text{He}$. Aunque el tiempo de vida media del núcleo de ${}^8\text{Be}$ aparenta ser muy bajo (2.6×10^{-16} s), en realidad es largo comparado al tiempo que le toma a una partícula alfa unirse al núcleo de ${}^8\text{Be}$, que es aproximadamente tres órdenes de magnitud mayor.

La reacción (72) produce en realidad un isótopo de carbono en un estado excitado que llamamos ${}^{12}\text{C}^*$. La desexcitación de este ${}^{12}\text{C}^*$ a un estado base se da por la emisión de un par de fotones. Esto toma aproximadamente 1.8×10^{-16} s, pero es despreciable comparado con las escalas de tiempo en la secuencia de reacciones cuando se asume un proceso de equilibrio.

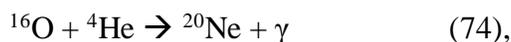
La reacción triple alfa tiene una dependencia a la temperatura de $E_{3\alpha} \propto T^{41}$. Esta dependencia es mucho mayor que las reacciones anteriores. Así mismo, este proceso tiene una dependencia a la densidad de $r_{3\alpha} \propto \rho^3$, cuando otras reacciones muestran una dependencia de ρ^2 . Esto nos indica que la sensibilidad a los cambios de temperatura y densidad es muy grande lo que afectará en procesos posteriores de la vida de la estrella.

Existe también una producción de oxígeno ya que posteriormente el ${}^{12}\text{C}$ captura una partícula alfa:



Estos dos isótopos, el ^{12}C y el ^{16}O , son los principales productos de la fusión de helio. La proporción de estos productos no solo afecta a su propia nucleosíntesis sino también a la evolución futura de la estrella en sus posteriores fases de combustión (como se explicará más adelante). Esta proporción está determinada por la competencia de velocidades entre el proceso triple alfa y la reacción (73) a una temperatura determinada (deBoer et. al, 2017).

Una posible reacción subsecuente es una captura de una partícula alfa por parte del ^{16}O para formar ^{20}Ne y liberar energía:



sin embargo, esta última reacción tiene una eficiencia menor en comparación a las reacciones triple alfa y la reacción (73), por lo que la reacción (74) se considera despreciable en las condiciones estelares del quemado de helio y este proceso se detiene cuando el ^{16}O es sintetizado.

3.2.2 Destello en la capa de helio y generación de elementos hasta el hierro

Hay un momento en el que el helio en el centro se agota, por lo que el núcleo se vuelve a contraer formando un núcleo de C y O. Así mismo, se forma una nueva cáscara, esta vez de helio donde continúa la transformación de helio en carbono. Se mostrará a continuación un diagrama de la estrella en esta etapa evolutiva.

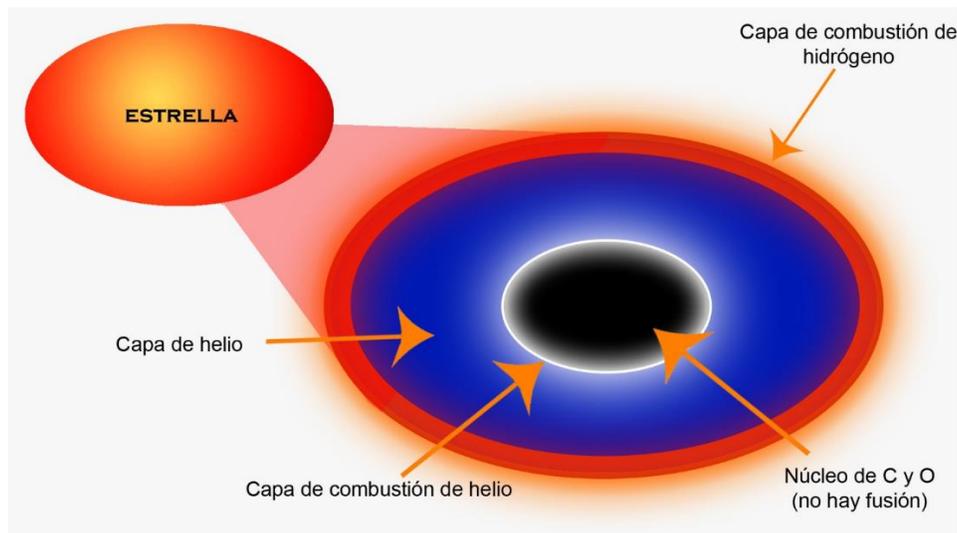
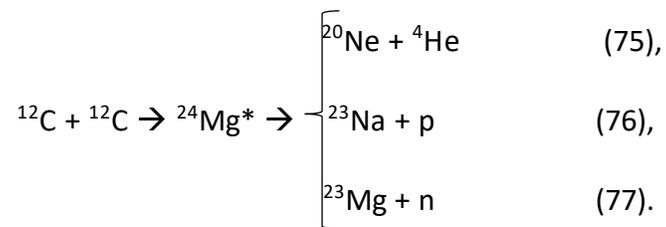


Figura 10. Mapa de las capas estelares en una etapa evolutiva particular. Tomado de https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution_postmain.html. Editado por la Lic. Tania Gabriela Zaldivar Arellano.

En estrellas menores a $8 M_{\odot}$, el C y O del núcleo no se logran fusionar (Rauscher, 2020). En este punto existen dos capas de combustión activas, una de helio y otra de hidrógeno, así como una región rica en He situada entre ambas. Cabe destacar que en la región rica en He, mostrada en azul en el diagrama, las condiciones no son suficientes para generar la fusión de este. La estrella, por lo tanto, se contrae por efecto gravitatorio y, debido a la gran dependencia a la densidad del proceso triple alfa, este aumenta y acelera su producción de energía en la capa de combustión de helio señalada como un anillo blanco en el diagrama y esta misma energía genera una presión de radiación que llega a sobrepasar la fuerza gravitacional. Esto hace que las capas externas se expandan y la capa de combustión de H se desplaza a radios mayores y, por tanto, a temperaturas más bajas, lo que provoca que la fusión de hidrógeno se detenga. Una vez que ha cesado el proceso triple alfa en la capa de combustión de He, la fuerza gravitatoria supera nuevamente la presión de radiación y las capas se vuelven a contraer, lo que reinicia la combustión de hidrógeno y el proceso triple alfa en sus respectivas capas. A este fenómeno de expansión/contracción se le conoce como “destello en la capa de helio”.

Así mismo, la generación de energía en la capa de combustión de helio no logra producir suficiente presión de radiación para vencer la fuerza gravitacional de la estrella y, por lo tanto, se imposibilita el equilibrio hidrostático. El núcleo se contrae hasta formar un núcleo de material degenerado que se conoce como enana blanca, mientras que las capas expulsadas forman una nebulosa planetaria. El concepto de material degenerado se sale de esta tesis, pero podemos decir brevemente que este material consiste fundamentalmente de protones a una alta densidad y ya no en forma de elementos químicos (Labrador y Falcón, 2008).

Para estrellas con masas mayores a $8 M_{\odot}$, los procesos de nucleosíntesis prosiguen con los núcleos más abundantes que hay, el ^{12}C y el ^{16}O . A temperaturas de $6-8 \times 10^8$ y densidades de 10^5 g cm^{-3} , el ^{12}C empieza a fusionarse en las siguientes reacciones:

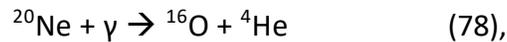


Un núcleo de carbono se fusiona con otro núcleo idéntico para formar $^{24}\text{Mg}^*$, es decir, magnesio en un estado excitado. Este magnesio puede decaer en tres posibles reacciones. La primera posibilidad (75) es que el núcleo de magnesio decaiga en ^{20}Ne y libere una partícula alfa. La segunda opción (76) consiste en el decaimiento de magnesio a un núcleo de ^{23}Na y se libera un protón. Finalmente, la tercera posibilidad (77) es que $^{24}\text{Mg}^*$ decaiga a ^{23}Mg y se libera un neutrón.

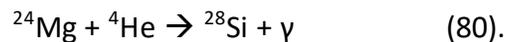
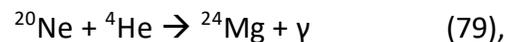
Las partículas liberadas luego experimentan varias reacciones con los núcleos que sobrevivieron de fases de combustión anteriores o se crearon directamente en la combustión de carbono. Los principales contribuyentes a la generación de energía son las reacciones (61), (62) y (73).

Además del ^{16}O aún presente de la combustión de He, los productos principales de la combustión de carbono son $^{20-22}\text{Ne}$, ^{23}Na , $^{24-26}\text{Mg}$ y $^{26,27}\text{Al}$. Pequeñas cantidades de $^{29,30}\text{Si}$ y ^{31}P también son generados.

A partir de estas etapas de combustión, las siguientes combustiones son determinadas por las barreras de Coulomb crecientes. Los elementos más abundantes después de la combustión de carbono son el O, Ne y Mg. La siguiente fase de combustión, sin embargo, no es la de oxígeno debido a que la reacción (74) en estas condiciones de temperatura puede liberar núcleos de Ne antes de la combustión de oxígeno ($^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$). La siguiente fase de combustión es, entonces, la de Ne siendo la reacción más importante:

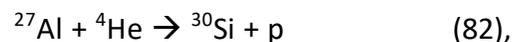
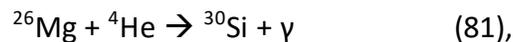


y, además, una secuencia de reacciones menos importantes:



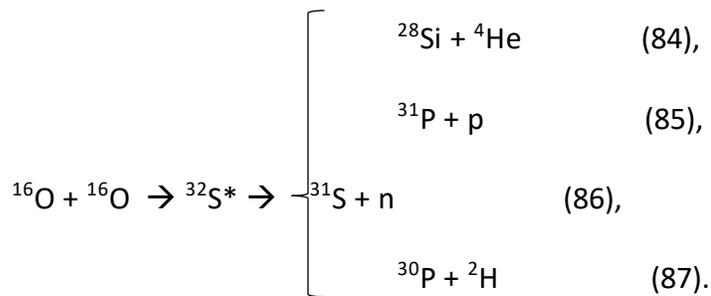
El rendimiento de energía es solo alrededor de una cuarta parte de la combustión de carbono y, por lo tanto, la combustión de Ne es breve. Su importancia radica en alterar la composición del plasma y no tanto en establecer una fase hidrostática estable a largo plazo.

Otras reacciones importantes son:



El resultado final de la combustión de Ne es que en la composición final se aumente el ^{16}O y los isótopos de Mg, Al, Si y P. Además, se sintetizan ^{36}S , ^{40}K , ^{46}Ca , ^{58}Fe y $^{61,62,64}\text{Ni}$ así como trazas de núcleos inestables como ^{22}Na y ^{26}Al . La combustión de Ne es viable en estrellas con masas iguales o mayores a $10 M_{\odot}$.

Al poco tiempo de iniciada la combustión de Ne, la temperatura ($2 \times 10^9 \text{ K}$) y densidad (10^7 g cm^{-3}) son suficientes para permitir la fusión de oxígeno. Similar a la de carbono, la fusión es seguida por la liberación de los siguientes núcleos:



Los núcleos liberados por el azufre excitado reaccionan con otros núcleos presentes en el plasma, generando un gran número de reacciones posibles. Los principales productos de la combustión de oxígeno son ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32-34}\text{S}$, ${}^{35,37}\text{Cl}$, ${}^{36,38}\text{Ar}$, ${}^{39,41}\text{K}$ y ${}^{40,42}\text{Ca}$, siendo los principales el ${}^{28}\text{Si}$ y ${}^{32}\text{S}$.

El último proceso se conoce como la combustión de Si y los productos mayoritarios de esta fase son el ${}^{54}\text{Fe}$ y el ${}^{56}\text{Fe}$. Sin embargo, también son sintetizados elementos como el ${}^{48,49}\text{Ti}$, ${}^{51}\text{V}$, ${}^{50,52,53}\text{Cr}$, ${}^{55}\text{Mn}$ y ${}^{54,56,57}\text{Fe}$ así como elementos más ligeros como lo son ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32}\text{S}$, ${}^{36}\text{Ar}$ y ${}^{40}\text{Ca}$.

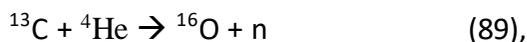
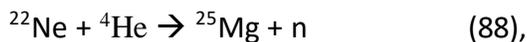
Como se mencionó en el prólogo, la energía de enlace por nucleón impide la síntesis de elementos más pesados que el Fe en condiciones estelares, por lo que la combustión estelar hidrostática como se ha manejado hasta ahora termina en este elemento, así como la vida de las estrellas.

4. Origen de los elementos más allá del hierro

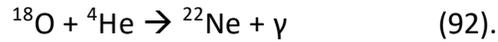
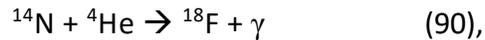
4.1 Proceso S

Como se ha explicado a lo largo de este trabajo, las fases regulares de combustión hidrostática solo conducen a la producción de núcleos hasta la región de hierro. Sin embargo, en algunas reacciones se pueden liberar neutrones y solo estos pueden generar eficientemente elementos con un mayor número de carga Z porque no se ven afectados por una barrera de Coulomb. Sin embargo, cabe aclarar que, aunque exista este flujo de neutrones, estos tienen un tiempo de vida media muy bajo en estado libre, por lo que sus reacciones son poco probables.

La fuente principal de neutrones son las reacciones:



que sintetizan además ${}^{25}\text{Mg}$ y ${}^{16}\text{O}$. Las abundancias relativas de ${}^{22}\text{Ne}$ y ${}^{13}\text{C}$ son generadas en el ciclo CNO y, además, hay otras rutas mediante las cuales pueden ser generados, como lo son:



Esta ruta es una reacción secundaria que actúa sobre el ^{14}N , el núcleo que domina el ciclo CNO debido a la reacción (31).

La ruta por la cual el ^{13}C es generado son las reacciones (28) y (29), dando así la posibilidad de que la reacción (89) pueda llevarse a cabo.

En el caso de existir núcleos más pesados de generaciones estelares pasadas como se mencionó en el capítulo 2.1, las reacciones (88) y (89), al ser las fuentes de neutrones en la fase de combustión de helio y carbono, pueden dar lugar a la generación de núcleos pesados hasta el ^{209}Bi . Este límite es debido a que el proceso s es dependiente a la densidad de neutrones y, debido a que es relativamente baja, las descomposiciones beta son más rápidas en muchos casos, en particular llegando a núcleos tan pesados como el Pb y Bi. Dicho de otra manera, el proceso solo termina con la descomposición alfa más allá del Pb y Bi, volviendo en cada caso a núcleos más ligeros.

Estas reacciones se generan durante la fusión de He y C debido a la generación de neutrones y las condiciones estelares en dichas fases. Así mismo, debido a que la cantidad de reacciones es muy alta y todas son captura de neutrones o electrones (EC) y decaimientos beta (β^- o β^+), se hará uso de un diagrama (Figura 11) mediante el cual el lector pueda observar el camino de reacción de algunos átomos. Así mismo, se agregará otro diagrama (Figura 12) en donde se podrá observar el límite del ^{209}Bi siendo este el último núcleo estable del proceso s. Un isótopo de Bi puede ser transformado en Po, sin embargo, este átomo posee un tiempo de vida media muy corto por lo que decae de manera prácticamente espontánea.

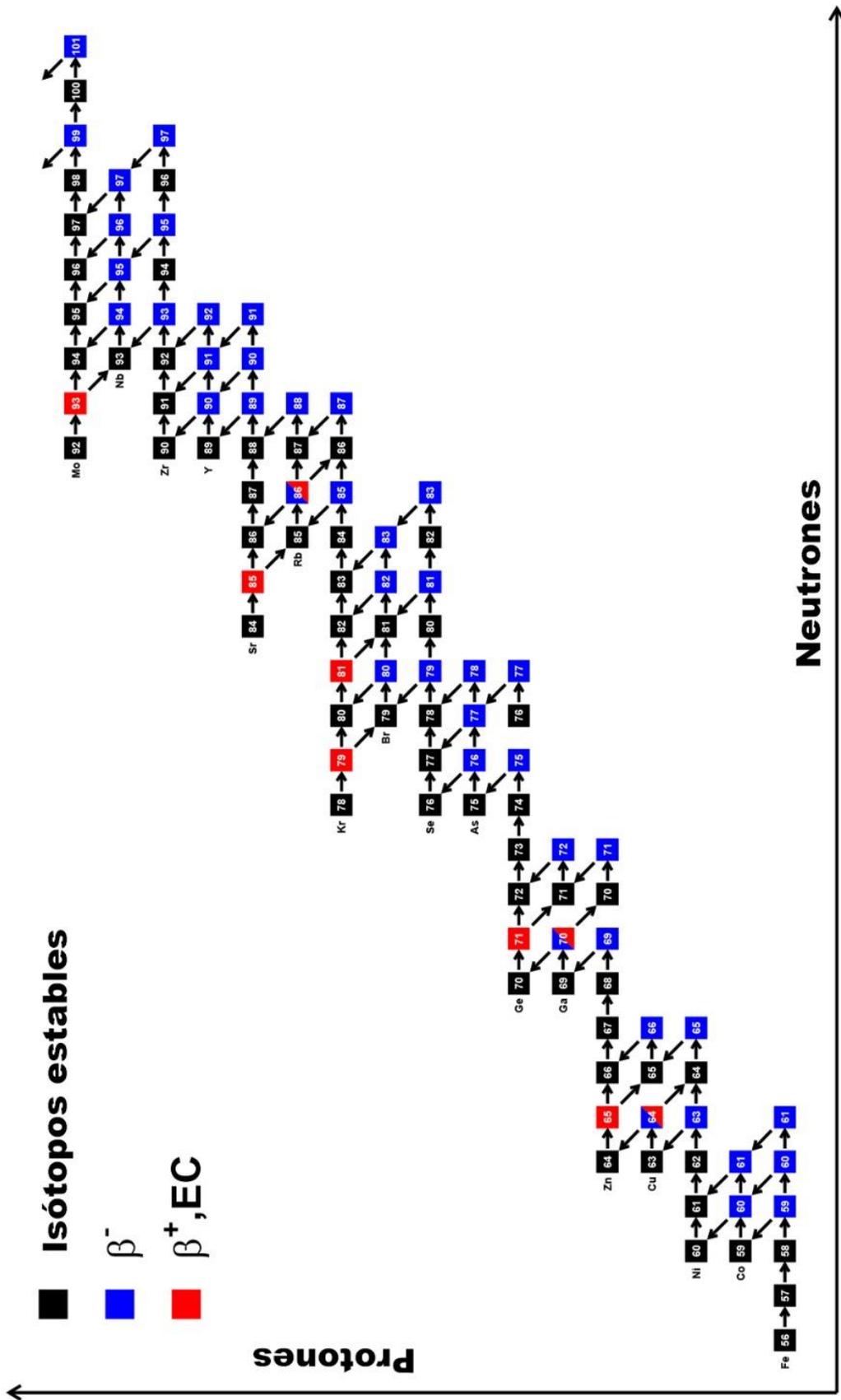


Figura 11. Camino de reacción de algunos elementos pesados. (Reifarth, 2010). Editado por la Lic. Tania Gabriela Zaldívar Arellano.

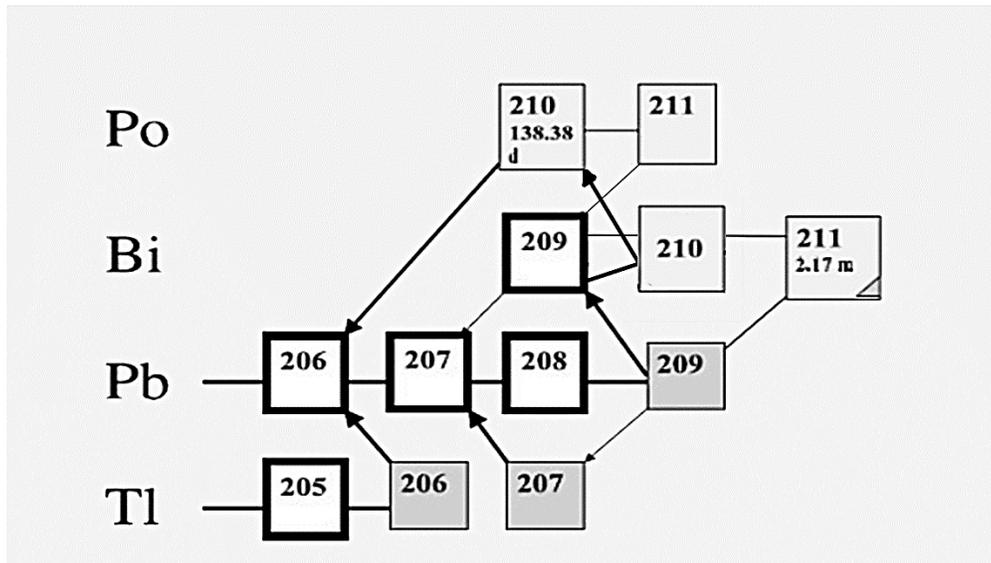


Figura 12. Límite del Bi. Tomado de Bisterzo et al. (2007). Editado por la Lic. Tania Gabriela Zaldívar Arellano.

4.2 Nucleosíntesis explosiva

Existen otros procesos (véase Kajino et al., 2019) que pueden sintetizar elementos más allá del ^{209}Bi , siendo el límite encontrado en la naturaleza el Plutonio ^{244}Pu (véase Hoffman, D., & Lawrence, F., 1971).

La etapa final o *muerte* de una estrella depende de su masa. Ya se habló sobre la generación de una enana blanca para estrellas $\leq 8 M_{\odot}$. Para estrellas de masas mayores, el final resulta ser muy explosivo ya que la estrella se colapsa sin detenerse en la etapa de enana blanca debido a que la fuerza gravitatoria es ahora muy fuerte y se contrae sin poder producir una energía nuclear que pueda generar una presión de radiación que lo contrarreste. A este fenómeno se le conoce como *supernova*, que es el *final* de una estrella masiva mediante una liberación energética muy grande. El núcleo remanente, dependiendo de la masa de la estrella, se puede volver una estrella de neutrones (véase Salas y Solis, 2005) o, si el colapso proviene de una estrella aún más masiva, el núcleo se contrae a tal punto que la velocidad de escape de su superficie es mayor a la velocidad de la luz. Es esto a lo que llamamos un agujero negro (Hawking, 2002).

Durante la explosión de la supernova se expulsa material a muy alta velocidad. Este material, con el tiempo, es lo que vemos como un remanente de supernova. El material expulsado, al tener una velocidad muy alta, logra que los neutrones puedan sobrevivir el tiempo suficiente para poder recombinarse con los elementos que están siendo expulsados y formar elementos más pesados mediante la captura de neutrones y posteriormente un decaimiento beta negativo de estos (el neutrón se convierte en protón) y, por lo tanto, el número atómico aumenta. Este proceso se puede repetir sobre el mismo elemento produciendo cada vez elementos con un

mayor número atómico hasta el plutonio como se mencionó anteriormente. Este remanente de supernova se contrae nuevamente por efecto gravitacional, generando nuevas estrellas con un gas enriquecido con elementos químicos diversos.

5. Actividades

Para las actividades se propone la utilización de un registro aprendizaje como el que propone Chamizo (1996) en donde cada actividad puede ser evaluada de 0-3 puntos de acuerdo con el aprendizaje adquirido (ver tabla 1).

| Aspecto evaluado | Puntos |
|--|--------|
| No se realiza la actividad | 0 |
| Se realiza correctamente la actividad relacionada con el conocimiento químico. | 1 |
| Se realiza correctamente la actividad relacionada con el saber químico y astronómico | 2 |
| Se realiza correctamente la actividad química y astronómica y se logra una integración de conocimiento entre ambas disciplinas | 3 |

Actividad 1: Etapas de los orígenes de los elementos químicos

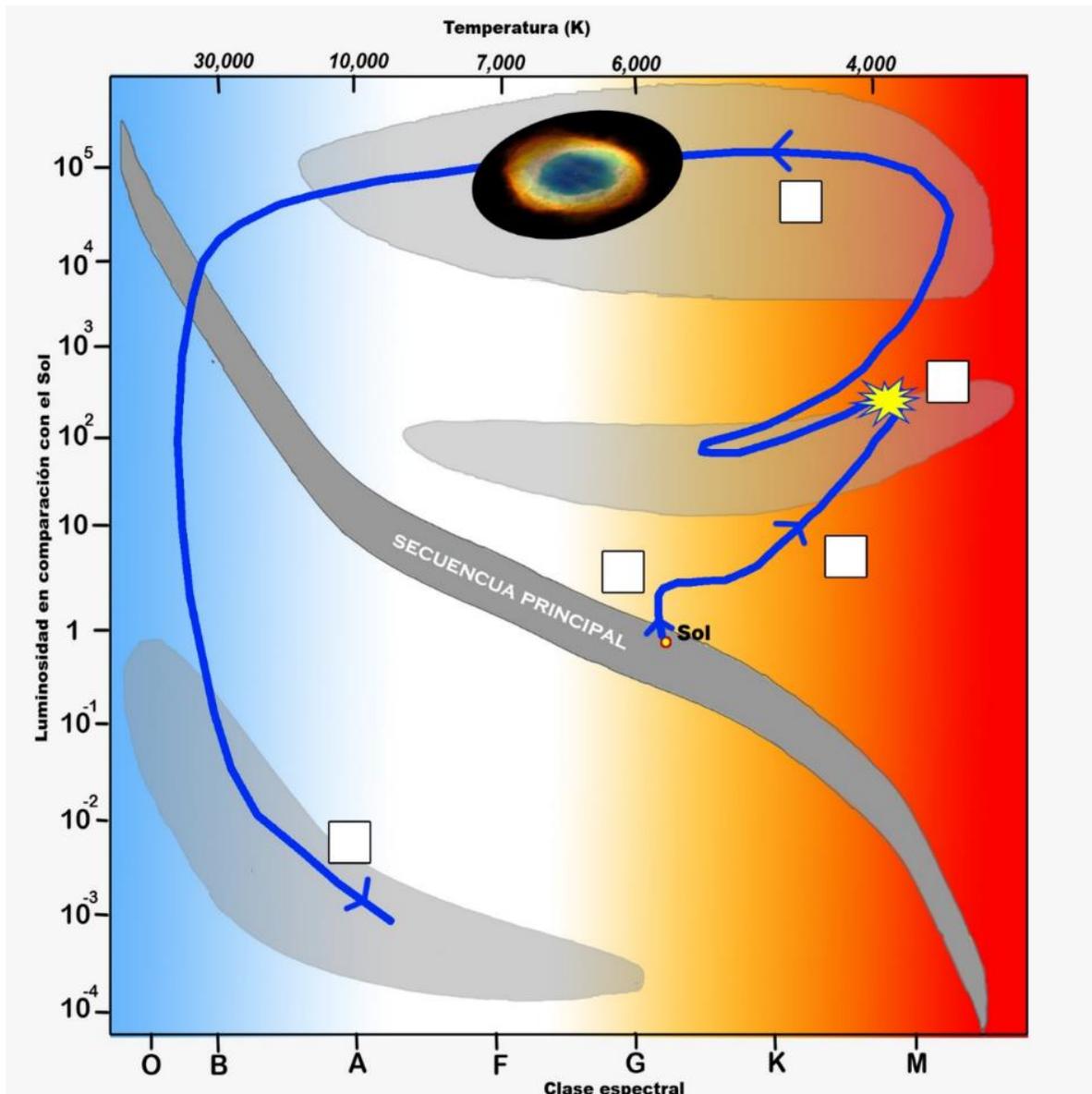
Al adentrarnos al estudio de la nucleosíntesis nos adentramos, en realidad, en el origen de todos los elementos químicos de la tabla periódica que se puedan encontrar en la naturaleza, es decir, del H al Pu. Sin embargo, a lo largo de la unidad didáctica hemos observado que por diversos fenómenos estos elementos son sintetizados dependiendo de ciertas condiciones. A continuación, enumere las etapas o límites de cada bloque de síntesis de elementos con sus respectivas explicaciones a dichos límites:

| Intervalo de elementos | Nombre del proceso | Justificación |
|------------------------|------------------------|----------------------------|
| He-Be | | |
| | Nucleosíntesis estelar | |
| | | Densidad de neutrones baja |
| Fe-Pu | | |

Actividad 2: Mapa de la evolución estelar del Sol en el diagrama H-R

Como se mencionó en el prólogo, se hace uso de un diagrama H-R que relaciona la luminosidad, temperatura y otros parámetros, pero que además nos sirve para identificar la etapa en la cual se encuentra una estrella en su vida. Por lo tanto, se puede identificar a lo largo del diagrama los procesos que van sucediendo en el transcurso del tiempo. A continuación, se mostrará una ruta ya trazada por astrónomos sobre el futuro del Sol. Coloque en su respectivo lugar el número del proceso al cual se somete la estrella en ese punto de la ruta en el diagrama.

| | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| (1) Enana blanca | (2) $H \rightarrow He$ |
| (3) Formación de nebulosa planetaria | (4) Destello en la capa de helio |
| (5) $He \rightarrow C + O$ | |

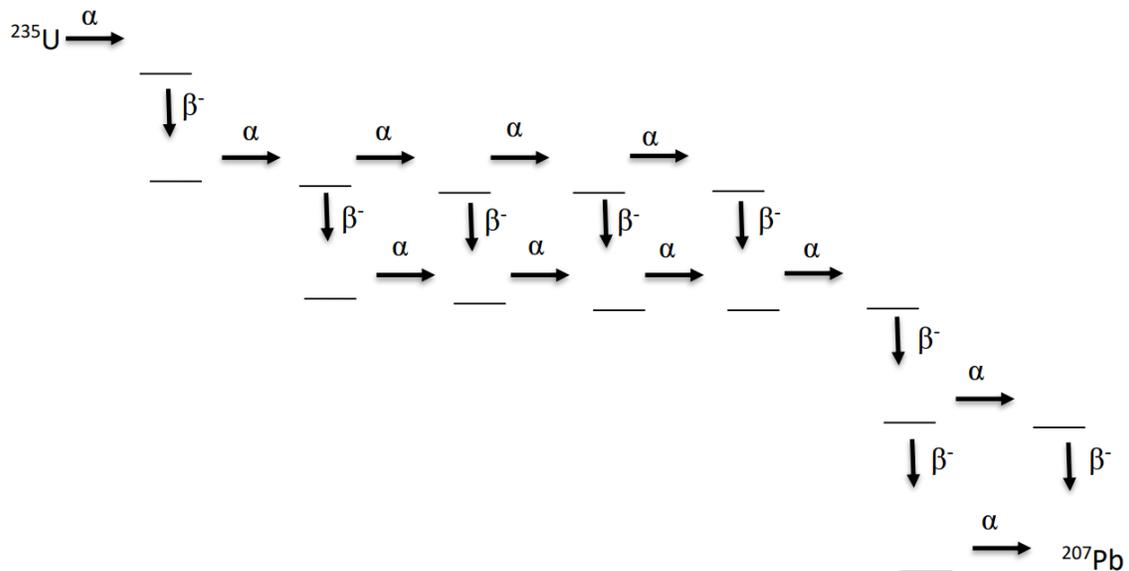


Actividad 3: Estabilidad atómica

A lo largo de la unidad didáctica se mencionó reiteradamente que se pueden generar una gran cantidad de isótopos de muchos elementos. Sin embargo, una gran cantidad de estos átomos son inestables, es decir, su tiempo de vida media es muy corto. Explicar en detalle porque estos isótopos son inestables. *Pista: fuerza nuclear fuerte.

Actividad 4. Decaimientos radioactivos.

Como se observó en una gran cantidad de reacciones de nucleosíntesis mencionadas en la unidad didáctica, muchas de ellas implican un decaimiento radioactivo. Completa los siguientes decaimientos colocando el isótopo y/o los productos correspondientes en el espacio correspondiente.



Así mismo, en la figura 11 encontramos en rojo recuadros con decaimientos β^+ . Escribe los isótopos y/o los productos correspondientes:

| | |
|------------------------------|------------------------------|
| $^{93}\text{Mo} \rightarrow$ | $^{81}\text{Kr} \rightarrow$ |
| $^{85}\text{Sr} \rightarrow$ | $^{71}\text{Ge} \rightarrow$ |
| $^{86}\text{Rb} \rightarrow$ | $^{70}\text{Ga} \rightarrow$ |
| $^{79}\text{Kr} \rightarrow$ | $^{65}\text{Zn} \rightarrow$ |
| $^{64}\text{Cu} \rightarrow$ | |

5.2.- Validación

Como ya se explicó en el inciso 2.2 de esta tesis, se requiere validar el material didáctico para saber si cumple los objetivos establecidos. Los resultados que se presentan a continuación son el resultado de la aplicación de la escala de Likert y el diferencial semántico de Osgood descritos en el inciso 4.3.

La muestra poblacional fueron 37 estudiantes del curso “Química Inorgánica I” que se imparte en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

En el siguiente cuadro se muestra el resultado promedio de la aplicación de la escala de Likert por cada pregunta. En la escala se da valores de 1 a 4, siendo el 1 el valor más bajo.

| | |
|--|------|
| ¿Qué tan comprensible es la unidad didáctica? | 3.08 |
| ¿Qué tanto las actividades le permitieron profundizar en el conocimiento del tema? | 2.92 |
| ¿Qué tanto considera que su conocimiento químico sobre el tema mejoró en comparación al que tenía antes de utilizar la unidad didáctica? | 2.83 |
| ¿Qué tan familiares le son los conceptos utilizados en esta unidad didáctica? | 3.25 |
| ¿Qué tanto considera que mejoró su conocimiento de nucleosíntesis en la química con respecto al que tenía antes de utilizar la unidad didáctica? | 2.83 |
| ¿Qué tan agradable le es el diseño de la unidad didáctica? | 3.33 |
| ¿Fueron de ayuda los diagramas utilizados en la unidad didáctica? | 3.33 |
| ¿Consideras que hay una relación lógica en el ordenamiento de la unidad didáctica? | 3.50 |
| ¿Consideras que el contenido del prólogo le ayudó a comprender la unidad didáctica? | 3.00 |

Tabla 2. Promedios de los alumnos en la escala de Likert

A continuación, se muestran los resultados del diferencial semántico de Osgood. En esta escala se dan valores de 1 a 7 siendo el 1 el valor más bajo:

| Adjetivos | Promedio | Desviación Estándar |
|------------------------|----------|---------------------|
| Bueno/Malo | 6.25 | 0.866 |
| Entretenido/Aburrido | 5.58 | 0.900 |
| Útil/Inútil | 6.33 | 0.888 |
| Profundo/Superficial | 5.50 | 1.51 |
| Agradable/Desagradable | 6.33 | 0.778 |
| Fácil/Difícil | 4.83 | 1.34 |
| Lento/Rápido | 4.67 | 1.50 |
| Extenso/Breve | 4.50 | 1.38 |
| Directo/Indirecto | 5.50 | 1.57 |
| Completo/Incompleto | 5.75 | 1.71 |

Tabla 3. Resultados de alumnos en el diferencial semántico de Osgood.

Si se observa, el promedio de cada par de adjetivos se mantiene por arriba de la mitad. Sin embargo, la desviación estándar de algunos pares de objetivos nos muestra una dispersión de datos ligeramente alta la cual se va a considerar en las correcciones de ser necesario.

Por último, se muestra a continuación la recopilación de algunos comentarios a algunas preguntas relacionadas con la escala de Likert:

¿Qué tan comprensible es la unidad didáctica? ¿Por qué?

Mucho: 4; Suficiente: 3; Poco: 2; Nada: 1

A1: 2, Porque ya muchas cosas habían visto en clase, pero sirvió como un pequeño repaso para saber que tan bien voy.

A2: 3, Están planteadas de buena forma para el tema, pero tal vez un poco muy cercano a la nucleosíntesis en vista de la astronomía

A3: 3, Porque te ayudan a identificar que tanto sabes y/o aprendiste de la información más importante sobre el tema

A4: 3, fue un reto la actividad de los decaimiento beta dónde colocamos los isótopos ya que entendí poner todos los que había en el region

A5: 3, Aunque las preguntas ponían a prueba tus conocimientos algunas preguntas resultaban poco comprensibles. Por ejemplo el ejercicio 1, dónde se pedía justificar, yo entendí que era el porque del proceso pero la pregunta era el porque de los límites de nucleosíntesis

A6: 3, Considero que eran algo complicadas y al menos sólo la pudo resolver una persona con estudios avanzados

A7: 2, Esperaba más una exposición o bien un concentrado antes de la actividad

A8: 4, Nos da una explicación más detallada de la nucleosíntesis, mediante explicaciones astronómicas para tener una conciencia espacial y física de cómo se originó

A9: 2, No hubo una buena retroalimentación al revelar las respuestas

A10: 3, te dan bastante informacion y la ponen a prueba por medio de actividades no repetitivas

¿Qué tanto las actividades le permitieron profundizar en el conocimiento del tema?

A1: 2, Porque ya muchas cosas habían visto en clase, pero sirvió como un pequeño repaso para saber que tan bien voy.

A2: 3, A pesar de no haber leído previamente el documento, entendí mejor con las actividades que leyendo en el momento sin ellas

A3: 3, Porque te ayudan a identificar que tanto sabes y/o aprendiste de la información más importante sobre el tema

A4: 3, fue un reto la actividad de los decaimiento beta dónde colocamos los isótopos ya que entendí poner todos los que había en el reglón

A5: 3, Aunque las preguntas ponían a prueba tus conocimientos algunas preguntas resultaban poco comprensibles. Por ejemplo el ejercicio 1, dónde se pedía justificar, yo entendí que era el porque del proceso pero la pregunta era el porque de los límites de nucleosíntesis

A6: 4, Nos da una explicación más detallada de la nucleosíntesis, mediante explicaciones astronómicas para tener una conciencia espacial y física de cómo se originó

A7: 3, te dan bastante informacion y la ponen a prueba por medio de actividades no repetitivas

A8: 3, Están planteadas de buena forma para el tema, pero tal vez un poco muy cercano a la nucleosíntesis en vista de la astronomía

A9: 4, porque te hacían procesar toda la información y aplicarla

A10: 3, Considero que fue bastante correcto el uso y los temas aplicados en las actividades.

¿Qué tanto considera que su conocimiento químico sobre el tema mejoró en comparación al que tenía antes de utilizar la unidad didáctica?

A1: 2, Porque el profesor ya había dado el tema bien, y lo comprendí bien.

A2: 3, Dio una idea más clara del tema

A3: 3, Te ayuda a resolver dudas

A4: 3, había cosas que no sabía y con la unidad didáctica pude reforzar los conceptos

A5: 3, Ya conocía del tema y fueron cosas muy específicas las que logré aprender

A6: 3, Me aportó información en cuanto a temas que no recordaba y los reforzó

A7: 3, falta información

A8: 4, Puedo dar una idea y explicación más detallada de la nucleosíntesis, sin necesidad de dejar explicaciones al aire, al tener mayor conocimiento

A9: 2, La mayor parte del tema la sabíamos por clases anteriores de inorgánica y el resto de información no quedó del todo clara.

A10: 3, Aumenta el conocimiento químico al explicar cómo se forman y crean los elementos químicos (básicamente nuestro instrumento de trabajo) y explicar diferencias interesantes sobre ellos sobre todo en términos energéticos. Ya que el tema va en algunas ocasiones más ligado al ámbito de la física hubiera sido interesante que se profundizara en el impacto que este tema tiene en la química; por ejemplo ligar el decaimiento con algunos procesos que ocurren en la naturaleza como la radiación o algo similar aunque no deja de ser un texto muy interesante.

¿Qué tan familiares le son los conceptos utilizados en esta unidad didáctica?

A1: 4, Porque ya los había visto

A2: 3, Porque era información ya explicada en el pdf

A3: 3, cómo recursador de la materia puedo decir que me fue fácil entender, ya que en clase se vio a más profundo los temas

A4: 3, Ya se había estudiado antes

A5: 3, Porque se habían revisado en la unidad 1 del curso de inorgánica

A6: 3, los vimos antes de clase

A7: 3, Pese a ser conceptos conocidos para mi, el hecho que involucren mayor física en ellos los vuelve un poco más abstractos y más técnico en cuanto a referirse

A8: 3, Por los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y por la lectura proporcionada.

A9: Bastantes, el docente hizo un buen trabajo en la introducción del tema, pero la plática y el texto ayudaron a complementar lo visto en clase

A10: porque es lo que al principio de curso (el base y el recurse) se me quedo muy bien grabado

¿Qué tanto considera que mejoró su conocimiento de nucleosíntesis en la química con respecto al que tenía antes de utilizar la unidad didáctica?

A1: 2, Porque comprendí bien los temas

A2: 3, Se entendió de mejor manera la síntesis de elementos y se llegó a mayor conocimiento de los elementos posteriores al hierro

A3: 3, Tiene mucha información específica así que es de ayuda

A4: 3, en la unidad didáctica se habla del tema de neutrinos que no vimos en clase

A5: 3, Ya de había estudiado antes

A6: 3, No revisé completamente el trabajo y en gran parte me quedé con lo aprendido en la actividad

A7: 4, Reforzó mi conocimiento químico previo al introducir una nueva forma de relacionarlos

A8: 2, Considero que lo que no conocía sobre el tema fue más complejo de comprender y no concluí con un idea clara

A9: 4, Es un texto muy completo y abarca muchas cuestiones en las que generalmente no se profundizan, está bien organizado y las imágenes ayudan a entender mejor el texto. Es particularmente interesante para las personas que desean saber más del tema ya que explica y desglosa casi todas las reacciones importantes y puede ser un buen complemento para futuras explicaciones en clase.

A10: 3, Abarca procesos que ya vi y ya conozco, solo que de forma más precisa y profunda

¿Fueron de ayuda los diagramas utilizados en la unidad didáctica?

A1: 3, Eran vistosos.

A2: 4, Dan una idea más clara.

A3: 3, Son fáciles de entender.

A4: 3, Son fáciles de visualizar.

A5: 4, Es más digerible la información en esquemas.

A6: 3, En una pregunta que era de respuesta abierta, eran ambiguas las respuestas y no había un espacio delimitado para escribir.

A7: 3, Fueron llamativos.

A8: 4, Te ayudan a entender el tema de una forma nada tediosa y visualmente atractiva.

A9: 3, Recordé y reforcé los conocimientos de nucleosíntesis anteriores.

A10: 3, En general sí ya que complementan bien la lectura, aunque en particular puede ser complicada la lectura del diagrama 11 y 12 ya que no es muy claro sin una explicación. Por otra parte aunque no es un

aspecto didáctico, sino estético convendría hacer un acomodo de las imágenes de tal forma que no abarquen media hoja dejando huecos a los lados de las mismas ya que visualmente no se ve tan profesional. De manera personal agradezco que pongan las fuentes para quienes quieran indagar al respecto.

¿Consideras que hay una relación lógica en el ordenamiento de la unidad didáctica?

A1: 3, Porque si van relacionado los temas.

A2: 4, Por que sigue un orden lógico.

A3: 4, Esta bien construida.

A4: 4, Pienso que se parece bastante a como se dieron los temas en la asignatura.

A5: 4, Porque van de procesos de síntesis de núcleos ligeros hasta núcleos más pesados.

A6: 3, Las actividades seguían el mismo orden del curso.

A7: 3, Pregunta cosas eseciales.

A8: 4, Si, ya que se plantea a través de la creación de los elementos más simples a los más complejos lo cual es una forma intuitiva de abordar el problema.

A9: 4, Sigue un orden cronológico.

A10: 2, Sinceramente no sabría como juzgar eso.

¿Consideras que el contenido del prólogo le ayudó a comprender la unidad didáctica?

A1: 4, Ayuda a comprender varias cosas del lenguaje.

A2: 3, Porque si es lo deja de una manera sencilla de entender.

A3: 3, Da una idea de lo que se verá.

A4: 3, Viene bien explicado.

A5: 3, Explica bien los conceptos y fenómenos que suceden con los átomos.

A6: 3, Es bastante completo.

A7: 3, Resolvio dudas.

A8: 3, Si, pese a ser un pequeño resumen, explica de manera detallada lo demás que viene del escrito.

A9: 3, Sí fue un buen contenido de información ya que está generalizada y sencilla de comprender.

A10: Es preciso y claro.

En cuanto al último inciso, **Por favor indique sugerencias o comentarios acerca de la unidad didáctica**, se incluyen sólo algunos comentarios útiles para la mejora de la unidad.

A1: Es una unidad muy interesante y bien lograda en general, los únicos detalles que revisaría es agregar explicaciones sobre la lectura de algunos diagramas como el de la figura 11 y 12 ya que no son claros por sí mismos, además de dar más formato al texto y a las imágenes para dar una mejor impresión visual al lector.

A2: Una presentación al inicio o algo breve que de transcurso o bien para refrescar la memoria.

A3: Me hubiera encantado una breve exposición o una lectura grupal de la lectura.

De los comentarios hechos por los estudiantes al momento de validar la Unidad Didáctica, se subrayaron aquellos que de alguna manera cumplieron los objetivos que se plantearon desde que se diseñó la unidad didáctica. Otros comentarios ayudaron a mejorar la versión posterior de la unidad didáctica, cuyas modificaciones se muestran al final de este capítulo.

5.3.- Evaluación

Como ya se mencionó en la sección 2.3, la evaluación es importante para mejorar la enseñanza propuesta al estudiante y que este último nos comunique sus necesidades particulares de aprendizaje para un mejor desarrollo educativo. Como se mencionó en el inciso 4.3, el registro de aprendizaje es aquel que nos permite llevar a cabo esta evaluación, ya sea propia del estudiante o por parte de la persona que aplique esta evaluación. A continuación, se muestran los resultados comparando la autoevaluación del estudiante con la evaluación real obtenida utilizando la misma muestra de la validación de 37 personas (sección 5.2). Cabe resaltar que los resultados se llevaron a base 10 para una mejor comprensión:

| Promedio autoevaluación | Promedio evaluación real |
|-------------------------|--------------------------|
| 6.67 | 6.67 |
| 4.17 | 5.00 |
| 5.83 | 6.67 |
| 4.17 | 7.50 |
| 5.00 | 6.67 |
| 6.67 | 7.50 |
| 8.33 | 6.67 |
| 5.83 | 4.17 |
| 8.33 | 4.17 |

| | |
|-------|------|
| 4.17 | 5.00 |
| 6.67 | 6.67 |
| 5.83 | 6.67 |
| 5.83 | 8.33 |
| 5.00 | 5.00 |
| 6.67 | 6.67 |
| 3.33 | 3.33 |
| 8.33 | 9.17 |
| 4.17 | 8.33 |
| 5.00 | 4.17 |
| 8.33 | 7.50 |
| 5.83 | 4.17 |
| 6.67 | 5.00 |
| 7.50 | 5.83 |
| 3.33 | 5.00 |
| 10.00 | 5.00 |
| 7.50 | 4.17 |
| 5.83 | 5.00 |
| 5.00 | 3.33 |
| 10.00 | 5.00 |
| 7.50 | 4.17 |
| 10.00 | 7.50 |
| 6.67 | 6.67 |
| 6.67 | 5.00 |
| 8.33 | 5.83 |
| 8.33 | 8.33 |
| 5.83 | 7.50 |
| 9.17 | 7.50 |

Tabla 4. Resultados de la evaluación de actividades.

Como se puede denotar, existen diferencias entre la evaluación personal y la real. Se llegó a la conclusión, derivado de muchos comentarios, que los alumnos ya se sabían capacitados para realizar estas actividades producto de la enseñanza previa en su curso o lecturas adicionales que haya consultado por su cuenta. Sin embargo, en la práctica esto, en muchos casos, no fue así, también concluyendo que en gran parte fue por la ausencia de lectura completa de la unidad didáctica o por aversión a una mayor cantidad de términos físicos que químicos. Así mismo, hubo casos que obtuvieron una mayor calificación de lo esperado, esto puede ser por falta de confianza en sus conocimientos sobre física, química o cultura general o también producto del miedo ocasionado por la mención de la astronomía que parece tan ajena a la carrera de química.

5.4.- Correcciones a la unidad didáctica

Como primera corrección se nos hizo denotar una falta de entendimiento con respecto a la lectura de la figura 11. Por lo que se puede agregar un texto que hable sobre el uso de esta como se muestra a continuación:

“Esta tabla se puede leer en cualquier dirección. Las flechas entre isótopos de un mismo elemento indican captura de neutrones y las flechas diagonales denotan decaimientos. Los colores en cada isótopo muestran el tipo de decaimiento que sufren como se indica en la simbología de la misma tabla”.

Otros comentarios que realizaron fueron sobre el enfoque de la unidad didáctica. Para algunos, el contenido de esta iba más orientado hacia la física y/o la astronomía. Para corregir esto se puede agregar un párrafo en el prólogo previo a la explicación de los decaimientos que diga lo siguiente:

“La química asimilada por un estudiante de primeros semestres en las carreras de química o afines, involucran casi en su totalidad enlaces. Esto es, un intercambio de electrones en la nube electrónica donde se debe conservar la materia y energía. Sin embargo, en la química nuclear este intercambio de electrones no se lleva a cabo, sino que se observan cambios en el núcleo atómico donde, igualmente, se conserva la materia y energía.”

En la actividad 1 se remarcó la confusión con respecto a la justificación de las respuestas, por lo que se puede cambiar la redacción de la tabla como sigue:

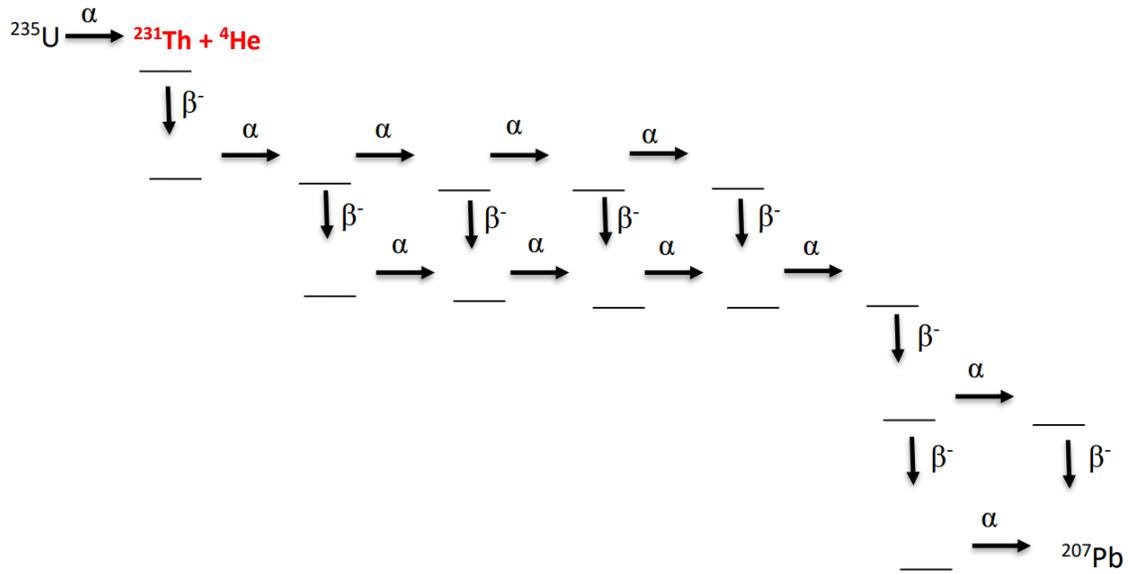
| Intervalo de elementos (límites) | Nombre del proceso | Justificación (de los límites) |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| He-Be | | |
| | Nucleosíntesis estelar | |
| | | Densidad de neutrones baja |
| Fe-Pu | | |

De esta manera, tanto en las instrucciones como en la tabla se utilizan las mismas palabras y se aclara la confusión con respecto a la justificación.

Así mismo, en la actividad 4 la primera parte se podría agregar lo siguiente:

“Así mismo, explica lo que significan las letras α y β colocando, a su vez, sus respectivas partículas liberadas”

De igual manera, se puede colocar el resultado de la primera reacción como ejemplo a la actividad:



CONCLUSIONES

6.- Conclusiones

6.1.- Sobre el diseño de la unidad didáctica

Se logró una propuesta de material didáctico para la enseñanza de la nucleosíntesis hacia estudiantes de tercer semestre de la Facultad de Química de la UNAM que fuese amena y coherente donde se pudiese observar una relación satisfactoria entre la astronomía y la química.

Es amena debido a la familiaridad de los conceptos y conocimientos requeridos para la comprensión de la unidad didáctica. Es coherente debido al nivel utilizado en esta unidad, ya que se manejaron bases astronómicas sencillas y relacionadas al tema en cuestión enfocadas hacia la química.

6.2.- Sobre la validación de la unidad didáctica

Se observa una recopilación adecuada de información con las herramientas utilizadas (escala de Likert y diferencial semántico de Osgood) para denotar la validez pedagógica de este material didáctico ya que los estudiantes calificaron a la unidad didáctica como buena, entretenida, útil, profunda, agradable, directa y completa.

En los adjetivos fácil/difícil, lento/rápido y extenso/breve se puede comprobar, mediante la desviación estándar, una mayor subjetividad dependiendo el nivel de interés y/o conocimientos previos del estudiante. En las correcciones se agregó un párrafo que procura una mayor facilidad en la redacción e introducción de la química nuclear a los estudiantes, pensando en facilitar la entrada a este tema.

6.3.- Sobre la evaluación del aprendizaje

Esta evaluación se concluye es satisfactoria en relación con su nivel y dependencia a la lectura de la unidad didáctica. Sin embargo, se observan ciertas dificultades con respecto a la comprensión de algunos temas que aparentan ser más avanzados y/o apegados a la parte de la astronomía. Esto, como se mencionó en el inciso 5.3, puede ser debido a la aversión o sentimiento ajeno de la astronomía en la química, motivo por el cual reafirma la necesidad de un texto como esta tesis en la enseñanza de la nucleosíntesis para estudiantes del área de la química.

BIBLIOGRAFÍA

7.- Bibliografía

Herrera, F., et al. (2015). *Astronomía lúdica: una oportunidad en la escuela primaria para acercarnos a las ciencias*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11371/157>.

Chávez, J., et al. (2015). Identificación de metales y no metales en las atmósferas de las estrellas. Un proyecto de colaboración docente del Instituto de astrofísica y del CCH Naucalpan para el curso de Química I. *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 9(S1)*, S1301-1-S1301-9. http://www.lajpe.org/jul15/S1301_Chavez_2015.pdf.

Escalante, S., & Gasque, L. (2012). El origen de los elementos y los diversos mecanismos de nucleosíntesis. *Educación Química, Vol. 23(1)*, 62–68. doi:[10.1016/s0187-893x\(17\)30100-3](https://doi.org/10.1016/s0187-893x(17)30100-3).

Hudson, R. L. (2006). Astrochemistry Examples in the Classroom. *Journal of Chemical Education, Vol. 83(11)*, 1611-1616. doi:[10.1021/ed083p1611](https://doi.org/10.1021/ed083p1611).

Martínez, J. (2012). Nucleosíntesis: El Origen Natural de los Elementos Químicos. *MoleQla: Revista de Química de la Universidad Pablo de Olavide*, (5), 28-30. https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/MoleQla-numero_5.pdf.

Rauscher, T. (2020). *Essentials of Nucleosynthesis and Theoretical Nuclear Astrophysics*. IOP Publishing. doi:[10.1088/2514-3433/ab8737](https://doi.org/10.1088/2514-3433/ab8737).

García, A., & Garritz, A. (2006). Desarrollo de una Unidad Didáctica: El Estudio del Enlace Químico en el Bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias, Vol. 24(1)*, 111-124. <https://ensciencias.uab.cat/article/view/v24-n1-garcia-garritz/1725>.

Tórrez, L. (2016). Planificación docente, en correspondencia con el desarrollo del proceso de Enseñanza–Aprendizaje. *Revista Científica de FAREM-Estelí: Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, (18), 5-18. <https://repositorio.unan.edu.ni/6542/1/251-927-1-PB.pdf>.

Ramos, R., & Malpica, S. (2013). *Uso de la Unidad Didáctica en la Educación Superior para la Mejora de la Evaluación Docente en la Universidad César Vallejo-Lima Este* [Magister en Docencia Universitaria, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/9545/Ramos_CRF-Malpica_CSF.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Villavicencio-Caparó, E., et al. (2016). Validación de Cuestionarios. *Revista OACTIVA UC Cuenca. Vol. 1(3)*, 75-80. <https://oactiva.ucacue.edu.ec/index.php/oactiva/article/view/200/338>.

Adrogué, C., et al. (2021). Influencia de las Estrategias y Aptitudes de Aprendizaje en el Desempeño Académico. *Revisa Educación. Vol. 45(1)*. 1-15. <https://doi.org/10.15517/revedu.v45i1.41065>

Hernández, R., et al. (1991). *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill. https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf.

Fernández, S. (2017). Evaluación y Aprendizaje. *Marco ELE: Revista de Didáctica ELE. (24)*. 1-43. https://marcoele.com/descargas/24/fernandez-evaluacion_aprendizaje.pdf.

- Torres Salas, M. I., (2010). La enseñanza tradicional de las ciencias versus las nuevas tendencias educativas. *Revista Electrónica Educare*, Vol. XIV(1), 131-142. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=194114419012>.
- Richard Feynman, «¿Qué es la ciencia?», Polis [En línea], 1 | 2001, Publicado el 30 noviembre 2012, consultado el 10 diciembre 2020. <http://journals.openedition.org/polis/8245>.
- Brown, T., et al. (2014). *Química La Ciencia Central*. Pearson Educación.
- Chang, R., & Goldsby, K. (2017). *Química*. McGraw-Hill.
- Izquierdo, M. (2004). Un Nuevo Enfoque de la Enseñanza de la Química: Contextualizar y Modelizar. *The Journal of the Argentine Chemical Society*, Vol. 92(4/6), 115-136. <http://www.scielo.org.ar/pdf/aaqa/v92n4-6/v92n4-6a13.pdf>.
- Housecroft, C., & Sharpe, A. (2012). *Inorganic Chemistry*. Pearson.
- Loveland, W., et al. (2006). *Modern Nuclear Chemistry*. John Wiley & Sons.
- Santiago Girola, R., et al. (2011). *Cuando la Astronomía Integra los Contenidos de Biología y Química: Un Juego Constructivo de Cooperación, Comunicación e Interacción*. Simposio Nacional de Educación en Astronomía. Río de Janeiro, Brasil. https://sab-astro.org.br/wp-content/uploads/2017/03/SNEA2011_TCP19.pdf.
- Clayton, D. (1983). *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*. The University of Chicago Press.
- Rodríguez Ebrard, L. (2009). La planeación de clase: Una habilidad docente que requiere de un marco teórico. *Odiseo, revista electrónica de pedagogía*, Vol. 7(13). 1-13. http://www.odiseo.com.mx/2009/7-13/rodriguez-planeacion_clase.html http://www.odiseo.com.mx/2009/7-13/rodriguez-planeacion_clase.html.
- Bueno, P. (2023). Enseñar Ciencias y Promover Habilidades de Pensamiento Crítico: Una Articulación Necesaria. *HOLOS*, Vol. 1(39). 1-13. doi: [10pts.15628/holos.2023.14340](https://doi.org/10.15628/holos.2023.14340).
- Rivas, S. F., Morales Bueno, P., & Saiz, C. (2014). Propiedades psicométricas de la adaptación peruana de la prueba de pensamiento crítico PENCRIAL. *Avaliação Psicológica*, 13(2), 257-268. <https://www.redalyc.org/pdf/3350/335031819013.pdf>.
- Facione, P. A. (2020). Critical thinking: What it is and why it counts. *Insight assessment*, 1(1), 1-23. <https://www.insightassessment.com/wp-content/uploads/ia/pdf/whatwhy.pdf>.
- Chamizo, J. (1996). Evaluación de los aprendizajes en Química. Segunda parte: Registros de aprendizaje, asociación de palabras y portafolios. *Educación Química*, Vol. 2(7). 86-89. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1996.2.66671>.
- Bethe, H. A. (1939). Energy Production in Stars. *Physical Review*, Vol. 55, 434-456. <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.55.434>.
- Walker, J., et al. (2014). *Fundamentals of Physics*. John Wiley & Sons.
- Einstein, A. (1905). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?. *Annalen der Physik*, Vol. 18. 639-641. http://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/einstein-papers/1905_18_639-641.pdf.
- Kragh, H. (2013). Big Bang: the etymology of a name. *Astronomy & Geophysics*, Vol. 54(2). 2.28-2.30. <https://doi.org/10.1093/astrogeo/att035>.

- Cruz, H. (2020). Propuesta para la enseñanza de la ley de Hubble-Lemaître mediante el uso de base de datos astronómicos [Tesis de licenciatura, Universidad Pedagógica Nacional]. Repositorio institucional UPN. http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/12463/Propuesta_para_la%20ense%3%b1anza_de_la%20ley_Hubble-Lema%3%aetre_mediante_el_uso_de_bases_de_datos%20astron%3%b3micos.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Hoyle, F. (1948). A New Model for the Expanding Universe. *Royal Astronomical Society*, Vol. 108(5). 372-382. <https://doi.org/10.1093/mnras/108.5.372>.
- Arcones, A., & Thielmann, FK. (2023). Origin of the elements. *Astron Astrophys*, Vol. 31(1). 1-109. <https://doi.org/10.1007/s00159-022-00146-x>.
- Rodríguez Jorge, L. F. (2008). La formación de las estrellas a través del tiempo. *Saberes compartidos*, (2). 11-20. https://www.researchgate.net/publication/259344583_Hc-tetx_y_la_EP.
- Baraffe, I., et al. (2003). Evolutionary models for cool brown dwarfs and extrasolar giant planets. The case of HD 209458. *A&A*, Vol. 402(2). 701-712. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030252>.
- Habets, G., & Heintze, J. (1981). Empirical bolometric corrections for the main-sequence. *A&A*, Vol 46. 193-237. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1981A%26AS...46..193H>.
- Shaviv, G. (2012). *The Synthesis of the Elements*. Springer.
- W. Pauli (carta, 4 de diciembre de 1930). <https://inspirehep.net/files/ceda89eb81759764d867728e46fc3755>.
- F. Reines & C. L. Cowan, Jr. (1953). Detection of the Free Neutrino. *American Physical Society*, Vol. 92(3). 830-831. <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.92.830>.
- García, E. (2016). Los neutrinos solares [Tesis de licenciatura, Universidad de La Laguna]. Repositorio institucional ULL. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/3049/Los%20Neutrinos%20Solares.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Dolgov, A. D. (2002). Neutrinos in cosmology. *Physics Reports*, Vol. 370(4-5). 333-535. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(02\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(02)00139-4).
- Langacker, P., et al. (1983). On the detection of cosmological neutrinos by coherent scattering. *Physical Review D*, Vol. 27(6). 1228-1242. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.27.1228>.
- Wiescher, M., et al. (2010). The Cold and Hot CNO Cycles. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, Vol. 60. 381-404. <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.nucl.012809.104505>.
- Boeltzig, A., Bruno, C. G., Cavanna, F., et al. (2016). Shell and explosive hydrogen burning. *The European Physical Journal A*, Vol. 52(75). 1-13. <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16075-4>.
- deBoer, R., et al. (2017). The $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ reaction and its implications for stellar helium burning. *Rev. Mod. Phys.* Vol 89 (035007). 1-74. <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.89.035007>.
- Labrador, J. & Falcón, N. (2008). Inestabilidad térmica de estrellas enanas blancas. *FARAUTE Ciens. y Tec.*, Vol 3(1). 17-24.

Reifarth, R. (2010). The s-process – overview and selected developments. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 202(012022). 1-6. doi: [10.1088/1742-6596/202/1/012022](https://doi.org/10.1088/1742-6596/202/1/012022).

Bisterzo, S., et al. (2007). Measurement of the $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}^g$ cross section and updated s-process analysis of the Pb/Bi region. *EDP Sciences*, (352). 1333-1336. <https://doi.org/10.1051/ndata:07488>.

Kajino, T., et al. (2019). Current status of r-process nucleosynthesis. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, Vol. 107. 109-166. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2019.02.008>.

Hoffman, D., Lawrence, F., et al. (1971). Detection of Plutonium-244 in Nature. *Nature*, Vol 234. 132-134. <https://doi.org/10.1038/234132a0>.

Salas, P. & Solís, M. A. (2006). Estrellas de neutrones. *Revista Mexicana de Física E.*, Vol 52(1). 37-46.

Hawking, S. W. (2013). Historia del tiempo. *Del Big Bang a los agujeros negros*. Planeta.