

TEMA 01: La Tierra en el Universo. Geología planetaria. Origen de la Tierra y el Sistema Solar.

AUTOR: Alberto Viñuela Miranda

Situar la Tierra en el Universo conlleva una **gran dificultad**, ya que debemos comenzar por **definir el Universo** en sí.

- Una definición **filosófica** sería «**Todo aquello que existe**».
- Otra más **científica** sería: «**Todo aquello que existe, OBSERVABLE**».

El problema es que **nuestra capacidad de observación es muy limitada** dada nuestra pequeñez en el Cosmos, y tampoco podemos experimentar con él.

Debemos, por tanto **conformarnos** con la **elaboración de modelos**.

El **modelo vigente** es el Λ CDM.

Parte del hecho contrastado de que el Universo se originó con una **Gran Explosión** o **Big Bang** hace unos **13.800Ma** –**millones de años**–.

Existen al menos **tres pruebas irrefutables** de ello:

- La primera, la existencia del **Corrimiento al Rojo** o **Redshift**, descubierto por **Edwin Hubble** en **1929**. Del **efecto doppler** observado en la luz de las galaxias se comprueba que estas se alejan de nosotros, y todo lo demás, a una **velocidad tanto mayor cuanto mayor es la distancia**.
- La segunda prueba es la **proporción H/He observable**, que **corresponde teóricamente** con un hecho de estas características.
- La tercera es la existencia de un **Fondo Cósmico de Microondas**, residuo del calor de esa explosión, y que mantiene al Universo a una temperatura de unos **2K**.

No obstante, el **Big Bang por sí solo no explica algunos hechos**.

En **primer lugar**, la **expansión del Universo** no se mantiene o frena en el tiempo, **sino que acelera**. Actualmente, esto se explica por la existencia de una **energía oscura**, muy abundante.

Es el **factor Λ** del modelo Λ CDM, y que hace referencia a la **constante cosmológica**, utilizada en el contexto de las ecuaciones de Einstein para definir **un espacio de métrica variable**; en este caso **expansiva**.

La **materia oscura** complica aún más las cosas. Atisbada por **Fritz Zwicky** en **1933**, fue confirmada por **Vera Rubin** en **1978**.

Esta materia oscura, **10 veces más masiva** que la ordinaria, justifica que las **galaxias giren como lo hacen** y que sus **agrupaciones mantengan su cohesión**. La **materia visible** resulta **insuficiente**.

Las siglas **CDM** del modelo hacen referencia a **Cold Dark Matter**, o **Materia Oscura Fría**. Lo único seguro es que **no es materia bariónica** u ordinaria, ya que no interactúa electromagnéticamente. Su naturaleza es aún **misteriosa y polémica**.

El **tamaño del Universo** es otro problema a considerar, no solo por su **magnitud abrumadora** y por la constante **expansión del espacio** a la **velocidad de la luz**.

Recordemos que en **Cosmología** las distancias son tan grandes que precisan **unidades especiales**:

Para **distancias “cortas”**, como las **interplanetarias**, se utiliza la **Unidad Astronómica (UA)**, o radio medio de la órbita terrestre. Equivale a **unos 150 millones de km**.

Para **distancias “largas”**, como las **interestelares**, hay **dos unidades** principales:

- El **año-luz (light-year, ly)** es la más popular y representa la **distancia recorrida por un rayo de luz en un año**. Equivale a poco menos de **10 billones de km**.
- Astrónomos y astrofísicos prefieren el **parsec o paralaje-segundo (pc)**, equivalente a **3,26ly**. Es la distancia a la que 1UA abarca un segundo de arco.

La propia **expansión del Universo** también es problemática.

Por una parte, se **expande en todas direcciones**, con lo que su forma es **necesariamente esférica**. No obstante, **carece de centro** y nuestra **aparente posición central privilegiada** es sólo un **artefacto observacional**.

Por otra parte, los objetos más **lejanos en el espacio** también lo están **en el tiempo**, como demuestra la **Teoría de la Relatividad de Einstein**.

Por tanto, dado que el **tamaño del Universo cambia según su edad**, el **cálculo de su radio** debe tenerlo en cuenta. Por eso es frecuente toparse en los textos con **dos cifras, ambas correctas**:

- **13.800ly** se refiere a **Radio Aparente**: Resulta de multiplicar la edad del Universo por su expansión a la velocidad de la luz.
- **46.500ly** se refiere a **Radio Apropriado o Comóvil**: Resulta de igualar la expansión del espacio remoto con la del inmediato.

La **estructura a gran escala del Universo** es similar a una espuma formada por **galaxias ligadas gravitacionalmente** –el jabón– que delimitan **grandes vacíos** –las burbujas–.

Estas agrupaciones de galaxias se denominan **hipercúmulos** y según su geometría se llaman **filamentos** –linear– o **murallas** –planar–.

A su vez, están formados por grupos más pequeños: **supercúmulos** –miles de galaxias–, **cúmulos** –cientos– y **grupos** –decenas–.

Nuestra **“dirección de correo cósmica”**, sería algo como:

- **Hipercúmulo Piscis-Cetus**, **filamento** con una longitud de unos **1.000Mly**.
- **Supercúmulo Laniakea** (“*Cielo Inconmensurable*” en hawaiano), con un **radio** de unos **250Mly** y **100.000 galaxias**.
- **Lóbulo de Virgo**. Antes llamado “**Supercúmulo de Virgo**”, ahora se considera una mera **extensión de Laniakea**. Contiene unas **1.500 galaxias**.
- **Grupo Local**, formado por la **Vía Láctea**, nuestras vecinas la **Galaxia de Andrómeda** y la **Galaxia del Triángulo**, y casi un centenar de “**galaxias enanas**”, como las **Nubes de Magallanes**.
- **Galaxia Vía Láctea**, de unos **100Mly** de diámetro y al menos **cien mil millones de estrellas**.
- **Sistema Solar** en el **Brazo de Orión**, a unos **27kly** del agujero negro central galáctico, **Sagitario A***.

El **Sistema Solar**, nuestro hogar cósmico, está compuesto básicamente por **una** estrella central –el **Sol**–, los **planetas**, sus **satélites** y otros **cuerpos menores**.

El **Sol**, con sus $2 \cdot 10^{30}$ kg, y **1.400.000 km de diámetro**, contiene el **99,8% de la masa** del Sistema Solar. De ahí su **posición –casi– central**. En su núcleo ocurren **reacciones nucleares** que transforman sobre todo **hidrógeno en helio**, **radiando energía y partículas** al resto de cuerpos.

A pesar de su tamaño, es una **estrella promedio**. Su **temperatura superficial**, de **unos 6000K**, y por tanto su **clase espectral** también lo es, pues es una estrella **tipo G** dentro de la **clasificación estelar OBAFGKM**, que ordena las estrellas de **más calientes –azules– a más frías –rojas–**.

Conocemos los detalles de la evolución de las estrellas gracias al trabajo de **Hertzprung y Russell**. Su famoso **diagrama** ubica al Sol en la llamada **Secuencia Principal**. Por eso sabemos que

- Está en el **ecuador de su vida**.
- Que **vivirá otros 5.000Ma** antes de convertirse en **Gigante Roja**.
- Que sus capas externas formarán una –mal llamada– **Nebulosa Planetaria**.
- Que el **calor residual** de su núcleo desnudo brillará como **Enana Blanca** en el ultravioleta **durante billones de años** más.

En torno al Sol orbitan los planetas, pero, ¿**Cuál es la definición de planeta?**

Según la **Unión Astronómica Internacional**, un planeta es un cuerpo que

1. **Orbita una estrella**,
2. ha alcanzado **equilibrio hidrostático** –es decir, es un **esferoide**– y
3. ha **limpiado su órbita**.

Si solo cumple la primera condición, hablamos de **planeta menor**, cometas excluidos.

Si no cumple la última condición, hablamos entonces de “**planeta enano**”. En 2006 esta exigencia degradó a Plutón, para indignación de muchos escolares.

En cualquier caso, los criterios anteriores no impiden la existencia de una **gran variedad de tipos planetarios**.

Los **cuatro planetas interiores**, de tipo **terrestre, rocoso o telúrico**, son similares en **estructura y composición**: Todos tienen un **núcleo metálico ferroso** y una **superficie sólida silícea**. Pero ahí se acaban los parecidos.

Mercurio, parecido a la Luna, es poco interesante. Visitado por las **sondas Mariner** ya en los '60, solo destaca por su **gran núcleo** y la inesperada presencia de hielo en sus cráteres polares. **Carece de actividad tectónica** y el fuerte **viento solar impide que tenga atmósfera**. Su órbita es **muy excéntrica**, y el “**tidal locking**” o “**acoplamiento de marea**” provoca que su **día dure $\frac{2}{3}$ de su año**. No tiene satélites.

Venus se parece a la Tierra en tamaño –es poco menor–, pero en todo lo demás son muy distintos. Su **rotación es retrógrada** y además **muy lenta**, con lo que **carece de campo magnético**. No tiene satélites. **Tampoco tiene tectónica de placas** debido a la **falta de agua**. Su **superficie basáltica** está salpicada por **gigantescos volcanes de escudo**. Su **atmósfera** es de **CO₂ y H₂SO₄** y su **temperatura** en superficie de **450°C**. **Carl Sagan**, en su tesis doctoral, fue el primero en explicar estos valores postulando un **Efecto Invernadero** desbocado.

La **Tierra** es excepcional por **orbitar** en la **Zona de Habitabilidad**, –Zona “**Goldilocks**” o “**Ricitos de Oro**”–, ni muy cerca ni muy lejos del Sol, lo que permite la existencia de

agua en los tres estados. Este factor **se considera** fundamental para la **existencia de vida**.

Marte, el planeta **más visitado** con diferencia, es un **desierto frío** que en el pasado tuvo **agua líquida** y **atmósfera densa**. Es **probable que perdiera ambas** ya que al tener la **mitad de diámetro que la Tierra**, su **núcleo se enfrió y solidificó tempranamente**. Sin un campo magnético, el **viento solar arrastró su atmósfera** al espacio. A destacar su minúsculos satélites, **Phobos** y **Deimos**.

Los **planetas exteriores** del Sistema Solar comparten, además de su **gran tamaño**, la **ausencia de superficie sólida** y la presencia de **anillos**, excepcionales en Saturno. Pero lo realmente fascinante son sus **satélites**, por su **variedad de geologías y atmósferas**.

Los **gigantes gaseosos Júpiter y Saturno** merecen ser tratados conjuntamente.

Pueden considerarse "**estrellas fallidas**" que suponen **minisistemas** en sí mismos. Como aquellas, están compuestos principalmente por **hidrógeno**, que en sus **capas profundas** está como **metal líquido**, lo que les otorga un **poderoso campo magnético**; de hecho, **emiten en radiofrecuencia** el doble de energía que la que reciben del Sol.

Los **satélites jovianos Io, Europa, Ganímedes y Calixto** fueron descubiertos por **Galileo** en **1609**.

- **Io** es el cuerpo **más volcánicamente activo** del Sistema Solar.
- **Europa** renueva su **corteza helada** cada pocos miles de años y es posible que acoja **vida** en su **océano subsuperficial**.

Saturno, además de sus **anillos** estabilizados por "**satélites pastores**", posee **siete satélites esferoidales: Mimas, Encélado, Tethys, Dione, Rhea, Titán y Japeto**.

Todos son fascinantes, pero **Titán**, con su **atmósfera de nitrógeno**, **lagos de hidrocarburos** y **climatología** análoga a la de la Tierra, los supera a todos.

Los gigantes helados **Urano y Neptuno** también merecen ser tratados conjuntamente.

No fueron descubiertos hasta la **era científica: Urano** por **William Herschel** en **1781**; **Neptuno** por **Le Verrier** y **Galle** en **1846**.

Antes eran considerados "**hermanos menores**" de **Júpiter y Saturno** por sus **atmósferas similares**. Ahora sabemos que poseen **menos del 20% de hidrógeno** y **abundancia de CH_4 , H_2S , H_2O** y otros compuestos volátiles.

Urano tiene su **eje axial inclinado 98°C** respecto a la eclíptica, con lo que sus **satélites esferoidales Miranda, Ariel, Umbriel, Titania y Oberón** a veces pueden verse desde la Tierra formando una diana.

Neptuno posee un único satélite esferoidal: **Tritón**. Su **órbita retrógrada** revela que fue un **planeta menor capturado gravitacionalmente**.

Aparte de los planetas *sensu stricto* y sus satélites, en el Sistema Solar existen **otros cuerpos**.

Entre Marte y Júpiter no hay ningún planeta, solo **asteroides**, cuerpos "similares a estrellas" por su aspecto al telescopio.

Este planeta probablemente **no se llegó a formar** dado que la **masa presente es apenas $\frac{1}{3}$ de la de la Luna**. El objeto más grande es **Ceres**, con **1000km de diámetro**. Destacan también: **Juno, Vesta, Palas e Higiea**.

Entre Saturno y Neptuno tenemos a los **Centauros**, como **Quirón** y **Chariklo**.

El **Cinturón de Kuiper**, análogo al de asteroides, se extiende **más allá de Neptuno**. Hay dos tipos de **KBOs –Kuiper Belt Objects–**:

- **Clásicos o Cubewanos** (órbitas casi circulares), como **Quaoar** o **Makemake**.
- **Resonantes (2:3 con Neptuno)**, como **Plutón** o **Ixión**.

Lamentablemente, nuestro conocimiento de estos objetos se limita a un **fugaz sobrevuelo** de la sonda **New Horizons** sobre Plutón en **2015**. Esta reveló un mundo **complejísimo y tectónicamente activo**.

El **Disco Disperso** está formado por cuerpos aún más lejanos llamados **SDOs –Scattered Disc Objects–**, con **órbitas hiperexcéntricas**, como **Eris** o **Sedna**.

Más allá aún, en el **límite gravitatorio del Sistema Solar**, se ha hipotetizado la **Nube de Oort**, esférica y lugar de origen de los **cometas**.

Una vez descrito el Sistema solar, abordemos el problema de su **origen**.

La **explicación más aceptada** se propuso ya en el **siglo XVIII**. La **Hipótesis Nebular**,

- esbozada por **Swedenborg**,
- desarrollada por **Kant** y
- perfeccionada por **Laplace**,

afirma que el Sistema Solar se formó a partir de la **condensación gravitatoria de una gran nube de gas y polvo**.

Debido a la **Ley de Conservación del Momento Angular**, esta condensación adquirió una **forma mayormente plana**, con un **centro denso**, llamada **Disco Protoplanetario**, que:

- **Justifica**
 - el predominio de **órbitas circulares**,
 - la **distribución planar** de las órbitas de los planetas en la **ecliptica** y
 - la **rotación solidaria** del Sol.
- Se **observa actualmente** alrededor de estrellas en formación.

En el centro del disco, eventualmente, se iniciaron **reacciones nucleares**. Así **nació el Sol** hace unos **4600Ma**.

El subsecuente **viento solar** expulsó los **materiales más ligeros al exterior** del disco, donde se formaron los **Gigantes del Sistema Solar**.

En el **interior del disco** quedaron solo los **materiales más densos**: los llamados **planetesimales**: objetos rocosos con **diámetro mínimo** de **1km** formados por interacciones **primero electrostáticas y luego gravitatorias** del polvo original.

La lógica implacable de las ecuaciones de Newton llevó a la **acreción de planetesimales** para formar **protoplanetas**, de entre **100 y 1000km de diámetro**, que eventualmente –**no siempre**– pueden **fusionarse** y formar **planetas** o **satélites**.

Estos procesos de **coalescencia**, en **cuerpos suficientemente grandes**, conducen a su **estructuración en capas** según la **densidad y afinidad química** de sus componentes. Es el proceso conocido como **diferenciación planetaria**.

Este modelo de formación planetaria no está exento de problemas. Necesitamos **eventos post-formación** para explicar algunas **anomalías observables**, como puedan ser:

- La **lenta rotación retrógrada de Venus** o la **inclinación axial de Urano**.
- La **ausencia de planetas *sensu stricto*** en zonas como el **Cinturón de Asteroides**.
- El **gran tamaño de la Luna** de la Tierra.

Simulaciones informáticas muestran que la **estabilización de órbitas** es un proceso lento, caótico y hasta violento. **Implica procesos** de

- **migración orbital**,
- **captura gravitacional** de unos cuerpos por otros y
- **colisión**.

Los **procesos de migración** explican fácilmente que **las órbitas de los planetas interiores resuenen entre sí** y las de los **externos también**. La **resonancia 2:5 entre Júpiter y Saturno** ya era conocida por los astrólogos de la Antigüedad.

Un ejemplo **ya citado** de **captura gravitacional** es el de **Tritón por Neptuno**.

El análisis de las **rocas de las misiones Apolo** muestra que la **Tierra y la Luna** que tienen **firmas isotópicas idénticas** y que estuvieron **fundidas al mismo tiempo**. Esto se explica con **dos respectivos eventos de colisión**.

La **Hipótesis del Gran Impacto** asegura que la **proto-Tierra**, tan solo **10Ma** tras su formación, sufrió un **choque oblicuo con Theia**, un **planeta del tamaño de Marte**, con el que compartía órbita en un **punto de Lagrange**. Por **coalescencia de los restos** del choque se acabó **formando la Luna**.

La **fusión de los núcleos** de ambos planetas causó que el de la **Tierra actual** sea **excepcionalmente grande**.

Posteriormente (**4100Ma**→**3900Ma**) se produjo el **LHB –Late Heavy Bombardment–**, **Bombardeo Pesado Tardío**, tan intenso que llegó a **fundir las cortezas** tanto de la Tierra como de la Luna.

Para concluir, **el que escribe** se plantea **¿Qué imagen podría resumir todo lo expuesto hasta ahora?**

Esa imagen existe. Se conoce como **“Un Punto Azul Pálido” –Pale Blue Dot–** y fue tomada por la sonda **Voyager 1** en **1990**, a instancias del quizás más grande divulgador científico de todos los tiempos, **Carl Sagan**.

Tomada **más allá de Neptuno**, recoge un **“retrato de familia”** con **todos los planetas** del Sistema Solar.

En ella la Tierra aparece como un **sublime píxel azul** en medio de un rayo de Sol. En definitiva, **una mota de polvo en la inmensidad**.