

Tema 01

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

Alberto Viñuela Miranda

Última edición: 25 de septiembre de 2022

Introducción

1

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

El Universo

2

Definición

2.1

- 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 Lambda-CDM

2.2

El **modelo vigente** es el **Λ CDM**.

El Big Bang

2.2.1

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

13.787±0.020 Ma

Pruebas del Big Bang

2.2.1.1

Aclarar abreviatura **Ma** la primera vez que se use.

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.

25% de He-4

- 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 creo que nadie pueda poner objeción al uso de Kelvin.

Además, NO son grados.

Problemática del *Big Bang*

2.2.2

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

Energía Oscura: Factor Lambda

2.2.2.1

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**.

Materia Oscura: CDM

2.2.2.2

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**.

Los NEUTRINOS son partículas de interacción débil.

Los WIMP se diferencian en que tienen masa relevante.

Tamaño del Universo

2.3

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**.

El problema de la magnitud: Unidades especiales

2.3.1

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

Distancias cortas: Unidad Astronómica

2.3.1.1

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**.

Distancias largas: Años-luz y parsecs

2.3.1.2

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.

A partir de aquí podemos utilizar el símbolo **ly** sin problema.

$$1\text{ly} = 9.46 \times 10^{12}\text{km}$$

El problema de la expansión

2.3.2

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

Usar "Universo" conduce a menos cuestiones bizantinas que "espacio-tiempo".

El Universo como esfera

2.3.2.1

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**.

Distancia y tiempo

2.3.2.2

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**.

Distancias aparentes y apropiada/comóvil

2.3.2.3

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.

Estructura a gran escala del Universo

2.4

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–.

Dirección de correo cósmica

2.4.1

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

- **Hipercúmulo Piscis-Cetus**, **filamento** con una longitud de unos **1.000Mly**.
- **Supercúmulo Laniakea** (“*Cielo Incommensurable*” 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***.

HIPERCÚMULO o COMPLEJO DE SUPERCÚMULOS:

Según su geometría:
* Linear → FILAMENTOS
* Planar → MURALLAS.

SUPERCÚMULO:

Agrupación de GRUPOS y CÚMULOS.

CÚMULO:

galaxias > 100
 $\varnothing_{min} > 10 Mly$
↑ GAS intergaláctico caliente ⇒ Emisión de Rayos X

GRUPO:

galaxias ≤ 100
 $\varnothing \leq 10 Mly$
↓ GAS intergaláctico

El Cúmulo de Virgo *sensu stricto* está a unos 50Mly de la Tierra.

El asterisco distingue al objeto de sus alrededores.

El Sistema Solar

3

El **Sistema Solar**, nuestro hogar cósmico, está compuesto básicamente por **una es-**

Es de recibo recordar que el Sol es una estrella.

¡Recordar que hay sistemas con más de una!

trella central –el **Sol**–, los **planetas**, sus **satélites** y otros **cuerpos menores**.

El Sol

3.1

Descripción del Sol

3.1.0.1

El **Sol**, con sus $2 \cdot 10^{30} \text{kg}$, y **1.400.000km 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.

Clasificación del Sol

3.1.0.2

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–**.

$$T_{\text{fotosfera}} = 5.772K$$

«Oh, Be A Fine Girl: Kiss Me!»

Evolución del Sol

3.1.0.3

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.

Los planetas

3.2

Definición de planeta

3.2.1

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.

Diversidad de planetas

3.2.1.1

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

Geología Planetaria

4

Los planetas interiores

4.1

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

4.1.1

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.

Geofísica

4.1.1.1

Carece de **actividad tectónica** y el fuerte **viento solar** impide que tenga **atmósfera**.

Parámetros orbitales

4.1.1.2

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

4.1.2

Venus se parece a la Tierra en tamaño –es poco menor–, pero en todo lo demás son muy distintos.

Parámetros orbitales

4.1.2.1

Su **rotación es retrógrada** y además **muy lenta**, con lo que **carece de campo magnético**. No tiene satélites.

Geología

4.1.2.2

Tampoco tiene tectónica de placas debido a la **falta de agua**. Su **superficie basáltica** está salpicada por **gigantescos volcanes de escudo**.

Atmósfera

4.1.2.3

Su **atmósfera** es de **CO₂ y H₂SO₄** y su **temperatura** en superficie de **450°C**.

Evolución catastrófica

4.1.2.4

Carl Sagan, en su tesis doctoral, fue el primero en explicar estos valores postulando un **Efecto Invernadero** desbocado.

Tierra

4.1.3

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**.

Ojo: "orbitar" y no "estar".

Cuidado con ser tajante respecto a la necesidad de agua.

Marte

4.1.4

Marte, el planeta **más visitado** con diferencia, es un **desierto frío** que en el pasado tuvo **agua líquida** y **atmósfera densa**.

Evolución catastrófica

4.1.4.1

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.

Satélites

4.1.4.2

A destacar su minúsculos satélites, **Phobos** y **Deimos**.

Los planetas exteriores

4.2

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**.

Júpiter y Saturno

4.2.1

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

"Estrellas fallidas"

4.2.1.1

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.

15→30MHz

Satélites jovianos

4.2.1.2

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**.

Se puede decir que es "tectónicamente activa".

Satélites saturninos

4.2.1.3

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.

Mnemotécnico:
MiEnTe, DiReTija
de órbita más baja a más alta.

Urano y Neptuno

4.2.2

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

Descubrimiento tardío

4.2.2.1

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

Predominio de hielos

4.2.2.2

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.

Eje y satélites de Urano

4.2.2.3

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.

Mnemotécnico:

M-AUTO

de órbita más baja a más alta.

No confundir *Titania* con *Titán*.

Tritón, planeta capturado

4.2.2.4

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

De hecho, se parece muchísimo a Plutón en superficie y composición.

Otros cuerpos

4.3

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

El Cinturón de Asteroides

4.3.1

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**.

Centauros

4.3.2

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

El Cinturón de Kuiper o KBOs

4.3.3

El **Cinturón de Kuiper**, análogo al de asteroides, se extiende **más allá de Neptuno**.

Tipos de KBO

4.3.3.1

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**.

El primero descubierto fue *Al-bión* o QB-1, “*kiubian*”, de ahí el nombre.

El caso de Plutón

4.3.3.2

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**.

Mnemotécnico:

La aliteración del sonido **K**.

Mnemotécnico:

La aliteración de la sílaba **ON**.

El Disco Disperso

4.3.4

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

Mnemotécnico:
La aliteración del sonido S.

La Nube de Oort

4.3.5

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**.

El Origen del Sistema Solar

5

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

La Hipótesis Nebular

5.1

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

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

Principia rerum naturalium
1734 Emanuel Swedenborg

Theorie des Himmels
1755 Immanuel Kant

Exposition du systeme du monde
1796 Pierre-Simon Laplace

La Ley de Gravitación Universal
es de 1687

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

El Disco Protoplanetario

5.1.1

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 **eclíptica** y
 - la **rotación solidaria** del Sol.
- Se **observa actualmente** alrededor de estrellas en formación.

Nacimiento del Sol

5.1.1.1

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

Materiales ligeros en el exterior

5.1.1.2

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

Materiales pesados en el interior

5.1.1.3

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.

No hace falta enumerarlos otra vez.

Tamaño suficiente para tener dinámica interna de tipo gravitatoria y dinámica orbital NO afectada por el viento estelar.

Acreción de planetesimales

5.1.2

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**.

PROTOPLANETA:
Condensación de planetesimales que ha experimentado fusión interior.

Diferenciación planetaria

5.1.2.1

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**.

Muchos asteroides y KBOs son protoplanetas que no siguieron creciendo.

“Coalescer” no implica fusión. Cuidado con el uso de la palabra

Necesidad de eventos post-formación

5.2

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**.

Migración orbital

5.2.1

Los **procesos de migración** explican fácilmente que **las órbitas de los planetas interiores resuenan 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.

Captura gravitacional

5.2.2

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

Estar siempre pendiente de no repetirse, para ahorrar tiempo.

Colisiones

5.2.3

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**.

Hipótesis del Gran Impacto (firma isotópica)

5.2.3.1

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 Proto-Tierra ya era un planeta, no protoplaneta, a pesar del nombre.

No protoplaneta, pues excede los 1000km.

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

Late Heavy Bombardment (fusión simultánea)

5.2.3.2

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.

Conclusión

6

Evitar siempre usar “yo”, “me” y otras alusiones personales.

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

Un Punto Azul Pálido

6.0.0.1

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**.

Foto de familia

6.0.0.2

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

La Tierra en un píxel

6.0.0.3

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**.

Frase final dramática.