

Clase 2: El Sistema Solar

Ocho mundos, cuatro mil quinientos millones de años hacia adelante

Todas las cifras de las clases salen de simulaciones reales del motor MHD-INT v5.2.2. Las simulaciones parten de los valores ACTUALES de cada planeta y avanzan hacia el futuro. Escenario: 4.5 mil millones de años paso de 10 000 años motor MHD-INT v5.2.2.

Objetivos

- Reconocer qué planetas tienen campo magnético global y cuáles no
- Leer los resultados de una simulación de largo plazo
- Distinguir un dato medido de un resultado del modelo

1. El Sistema Solar

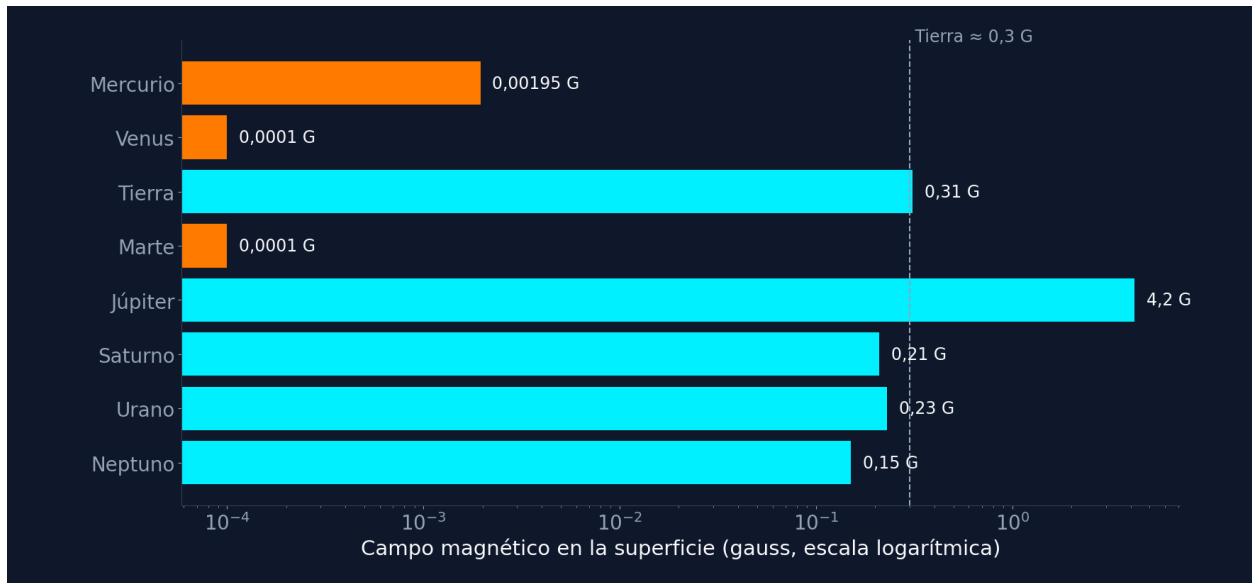
Bienvenidos a la segunda clase del curso de astrofísica computacional con MHD-INT. Hoy vamos a recorrer los ocho planetas del Sistema Solar y a ponerlos a prueba: los vamos a simular durante cuatro mil quinientos millones de años hacia el futuro y vamos a ver qué cambia y qué se mantiene.

2. Los ocho planetas en la simulación

Planeta	Distancia (UA) hoy → final	Duración del día hoy → final	Campo hoy (gauss)	Tiempo con escudo	MHI
Mercurio	0,387 → 0,387	58,6 d → 58,6 d	0,00195	0 %	14
Venus	0,723 → 0,723	243,2 d → 224,5 d	0,0001	0 %	26
Tierra	1,000 → 1,000	24 h → 3,0 d	0,31	100 %	91
Marte	1,524 → 1,524	25 h → 25 h	0,0001	0 %	21
Júpiter	5,203 → 5,203	10 h → 10 h	4,2	100 %	93
Saturno	9,537 → 9,537	11 h → 11 h	0,21	100 %	63
Urano	19,191 → 19,191	17 h → 17 h	0,23	100 %	43
Neptuno	30,070 → 30,070	16 h → 16 h	0,15	100 %	65

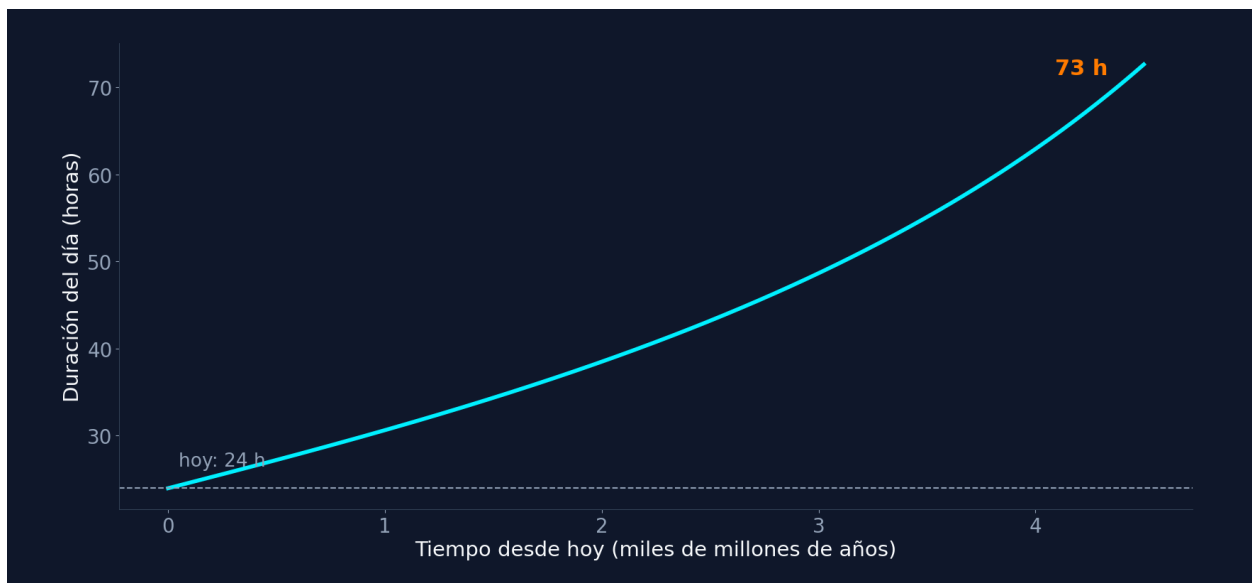
Esta tabla resume los ocho planetas tal como los usa el motor. Cada fila es una simulación completa de 4,5 mil millones de años, con un paso de 10 000 años. Lo primero que llama la atención es la columna de distancia al Sol: después de toda esa evolución, las órbitas prácticamente no cambian. La Tierra sigue a una unidad astronómica del Sol, con un cambio de menos de 1 kilómetro, y Neptuno sigue a 30,1. Para planetas tan lejos de su estrella, la marea que levantan en el Sol es diminuta, y el modelo lo confirma.

3. ¿Quién tiene escudo magnético?



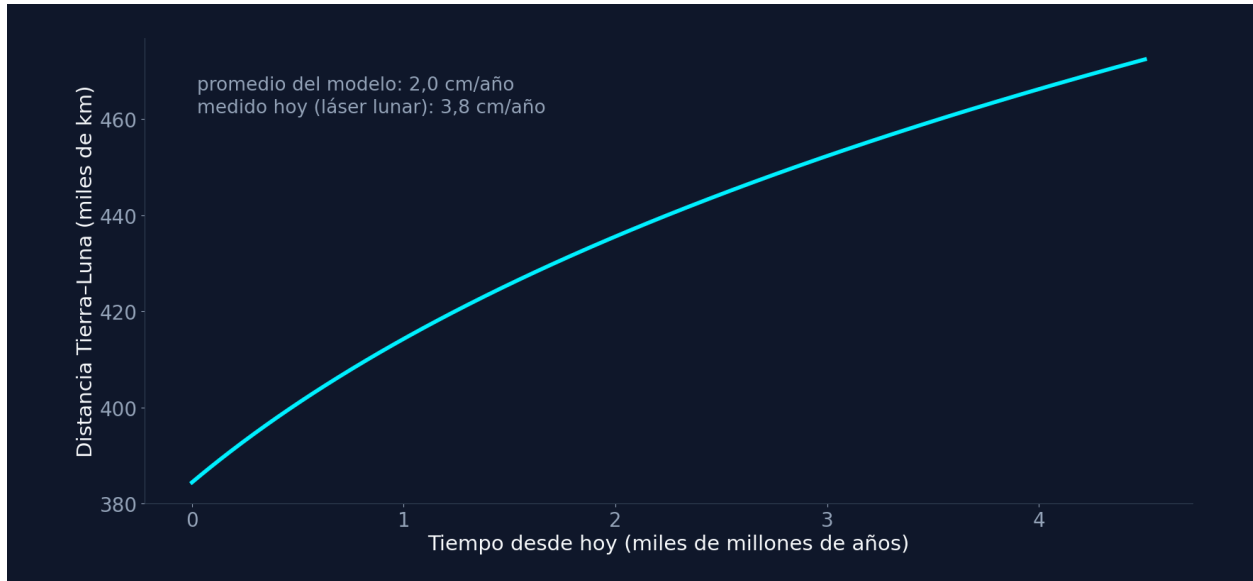
Ahora miremos el campo magnético de partida, que son valores medidos por sondas espaciales. Júpiter es el gigante indiscutido, con 4,2 gauss, unas trece veces el campo de la Tierra, que tiene 0,31. Saturno, Urano y Neptuno tienen campos parecidos al terrestre. Y del otro lado están Venus y Marte, que hoy no tienen un campo global. Marte lo tuvo: las rocas de su corteza todavía guardan magnetismo fósil, pero su dínamo se apagó hace unos cuatro mil millones de años. Mercurio tiene un campo global débil, de unas dos milésimas de gauss, medido por la sonda MESSENGER: unas 160 veces menor que el de la Tierra.

4. Los días se alargan



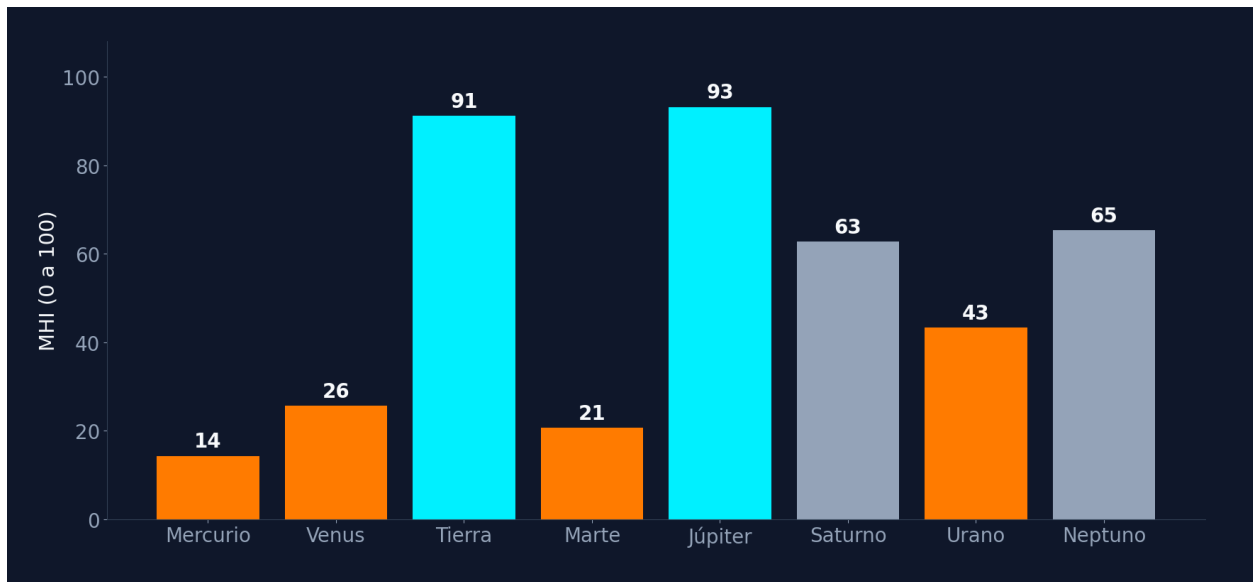
Ahora un resultado que sí sale del modelo. La Luna frena la rotación de la Tierra por efecto de marea. En la simulación, el día terrestre pasa de veinticuatro horas a unos 73 horas al cabo de 4,5 mil millones de años. Para comparar con la realidad: hoy el día se alarga unos dos milisegundos por siglo, y si ese ritmo se mantuviera llegaríamos a algo más de cincuenta horas. El modelo da un valor del mismo orden, aunque mayor, porque supone que la eficiencia de las mareas no cambia con el tiempo.

5. La Luna se aleja



La otra cara de la misma moneda: mientras la Tierra frena, la Luna se aleja. En la simulación pasa de 384 mil a 472 mil kilómetros, con un promedio de 2 centímetros por año. Hoy, los láseres que rebotan en los espejos que dejaron las misiones Apolo miden unos tres coma ocho centímetros por año. El modelo da un promedio menor a lo largo de miles de millones de años, y es una buena pregunta para la clase de mareas: ¿por qué el ritmo de hoy no tiene por qué ser el de siempre?

6. Un adelanto: la habitabilidad magnética



Por último, un adelanto de la clase diez. MHD-INT calcula un índice de habitabilidad magnética, de cero a cien. En el Sistema Solar, Júpiter obtiene 93 y la Tierra 91, mientras que Marte se queda en 21 y Venus en 26. Sin escudo magnético, el viento solar llega directo a la atmósfera. Que Júpiter puntúe alto no significa que se pueda vivir ahí: el índice mide solo la protección magnética, no si hay superficie, agua o temperatura adecuada.

7. Para practicar

Para practicar: abre MHD-INT, simula Marte y la Tierra durante cuatro mil quinientos millones de años y compara la columna de escudo magnético. Luego responde: ¿qué le pasaría a una atmósfera como la terrestre si estuviera en Marte? Nos vemos en la próxima clase.

Datos de la simulación

Planeta	MHI	Escudo	Campo activo	Campo hoy (G)	Magnetopausa (radios)
Mercurio	14	0 %	0 %	0.00195	0.5
Venus	26	0 %	0 %	0.0001	0.6
Tierra	91	100 %	87 %	0.31	9.7
Marte	21	0 %	0 %	0.0001	0.8
Jupiter	93	100 %	100 %	4.2	40.2
Saturno	63	100 %	0 %	0.21	5.4
Urano	43	100 %	0 %	0.23	7.2
Neptuno	65	100 %	0 %	0.15	7.0

Ejercicio

1. Simula Tierra y Marte durante 4,5 Gyr con $dt = 10\,000$ años.
2. Compara el porcentaje de tiempo con escudo magnético de cada uno.
3. Explica con tus palabras por qué la diferencia importa para una atmósfera.

Limitaciones del modelo

- Las simulaciones parten de los valores actuales y avanzan hacia el futuro: no reconstruyen el pasado (por ejemplo, el apagado del dínamo de Marte).
- El modelo supone una eficiencia de marea constante; por eso el alargamiento del día y la recesión lunar difieren de los ritmos medidos hoy.
- Venus: el modelo lo lleva hacia rotación sincrónica con el Sol (de 243 a ~225 días) porque la marea atmosférica está desactivada por defecto; en la realidad esa marea ayuda a mantener su rotación lenta y retrógrada.

Referencias

- Williams & Boggs (2016), Secular tidal changes in lunar orbit and Earth rotation.
- Anderson et al. (2011), The global magnetic field of Mercury from MESSENGER orbital observations.
- Acuña et al. (1999), Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor.