

# Borealis Horizon: un viaje relativista en tiempo real hasta los Pilares de la Creación — modelo, implementación y límites

Borealis Dynamics

Experimento público en <https://ngc6611.pages.dev> · versión 1.1.0 del sitio · despegue el 19 de octubre de 2026, 12:00 (UTC-3) · documento del 19/10/2026

---

## RESUMEN

La Borealis Horizon es una simulación pública, ejecutada en el navegador, de un viaje interestelar con aceleración propia constante de 1 g desde la Tierra hasta un punto a 7 años luz de los Pilares de la Creación (M16), con un recorrido de 6.985 años luz en el sistema de referencia de la Tierra. La simulación transcurre en tiempo real a partir de un instante de partida fijado en la publicación: el observador ve, en cada segundo de a bordo, el estado cinemático previsto por el modelo — obtenido por integración numérica en el ascenso y por expresiones en forma cerrada en las fases relativistas de aceleración y frenado — y el cielo que registraría una cámara de exposición fija. Este artículo documenta el modelo físico (movimiento hiperbólico en forma cerrada con una fase inicial newtoniana integrada por Runge-Kutta; dilatación del tiempo; retardo de señales y horizonte de aceleración; aberración y desplazamiento Doppler de color y brillo; extinción interestelar; fondo cósmico de microondas transformado dirección por dirección; reconstrucción tridimensional de la Nebulosa del Águila a partir de fotografías públicas; cohete de fotones ideal), las decisiones de implementación (formulaciones numéricamente estables para  $\gamma$  de hasta  $\sim 10^4$ , tablas precalculadas, integración que conserva el flujo, verificación mediante pruebas de regresión) y los límites conocidos. Con  $\gamma = 3.606$  en la inversión, 17,21 años de a bordo y 6.987 años en la Tierra, el viaje se presenta como un experimento de visualización: fiel donde la física es calculable y declaradamente simplificado donde la ingeniería o los datos no existen.

## ABSTRACT

Borealis Horizon is a public, browser-based simulation of an interstellar voyage at a constant proper acceleration of 1 g from Earth to a point 7 light-years short of the Pillars of Creation (M16), covering 6,985 light-years in Earth's frame. The simulation runs in real time from a launch instant fixed at publication: every board second shows the kinematic state predicted by the model — numerical integration during the ascent, closed-form expressions in the relativistic acceleration and braking phases — and the sky a fixed-exposure camera would record. This paper documents the physical model (closed-form hyperbolic motion with a Newtonian ascent phase integrated by Runge-Kutta; time dilation; signal delay and the acceleration horizon; aberration and Doppler shifts of colour and brightness; interstellar extinction; the cosmic microwave background transformed direction by direction; a three-dimensional reconstruction of the Eagle Nebula from public photographs; an ideal photon rocket), the implementation choices (numerically stable formulations up to  $\gamma \sim 10^4$ , precomputed tables, flux-conserving integration, regression tests) and the known limitations. With  $\gamma = 3,606$  at turnaround, 17.21 board years and 6,987 Earth years, the voyage is presented as a visualization experiment: faithful where physics is computable and openly simplified where engineering or data do not exist.

**Palabras clave:** relatividad especial; movimiento hiperbólico; aberración; efecto Doppler; fondo cósmico de microondas; Nebulosa del Águila; visualización científica; WebGL. **Keywords:** special relativity; hyperbolic motion; aberration; Doppler effect; cosmic microwave background; Eagle Nebula; scientific visualization; WebGL.

---

## 1. Introducción y diseño del experimento

Los viajes con aceleración propia constante son el ejemplo clásico de cómo la relatividad especial transforma distancias galácticas en duraciones humanas: la rapidez crece linealmente con el tiempo propio y la distancia recorrida crece exponencialmente con ella [1, 2]. Lo que rara vez se ve es el *aspecto* de ese viaje — cómo el cielo se comprime hacia delante, cómo cambian los colores, cómo el fondo cósmico de microondas (CMB) se convierte en un foco visible, cómo la imagen de la Tierra se congela detrás de la nave — presentado sin atajos, con los números correctos, a lo largo de la duración real del viaje.

La Borealis Horizon es ese experimento. La nave parte de una base costera ficticia, asciende con un empuje de 1,1 g, pasa a 1 g de aceleración propia constante, invierte el empuje a mitad del recorrido y se detiene, en reposo respecto de la Tierra, 7 años luz antes del plano de los Pilares de la Creación, después de 6.985 años luz. La simulación se ejecuta en un navegador común (HTML, JavaScript y WebGL2, sin bibliotecas externas), y el instante de partida,  $T_0 = 19/10/2026\ 12:00:00\ \text{UTC}-3$ , quedó sellado en la publicación: todos los visitantes ven la misma nave, en el mismo punto, en tiempo real. No hay aceleración del tiempo, pausa ni retroceso; el viaje dura 17,21 años de a bordo de duración real del sitio.

El diseño obedece a tres principios. (i) *Fidelidad donde hay cálculo*: cinemática, relojes, luz y fondo cósmico se calculan a partir de las leyes físicas, sin efectos escénicos. (ii) *Exposición fija*: la ganancia y la función de compresión tonal de la ventana se fijan de antemano, sin ajuste automático de la exposición según la escena. (iii) *Simplificación declarada*: lo que la ingeniería no sabe hacer (el motor, el escudo) y lo que los datos no contienen (la tercera dimensión de la nebulosa) se asume explícitamente y se enumera para el público en la página "Licencia poética" del sitio. Este artículo es la contraparte técnica de esa lista: describe el modelo, las fórmulas, la implementación y los problemas conocidos.

La Sección 2 presenta el modelo de movimiento; la Sección 3, el tiempo y las señales; la Sección 4, la luz (aberración, Doppler, extinción, catálogos, exposición, Tierra); la Sección 5, el fondo cósmico; la Sección 6, la reconstrucción de la Nebulosa del Águila; la Sección 7, la propulsión, la energía y el flujo en el escudo; la Sección 8, los encuentros escenográficos; la Sección 9, los instrumentos, el diario y la radio de a bordo; la Sección 10, la implementación y la robustez numérica; la Sección 11, las limitaciones y los problemas conocidos. Los apéndices reúnen constantes, parámetros e hitos.

## 2. Modelo de movimiento

### 2.1 Fase de ascenso ( $\tau < 24\ \text{h}$ )

La trayectoria es una función pura del tiempo de a bordo  $\tau$  (segundos desde la partida), definida en dos fases. En la primera, con una duración fija de un día de a bordo, la nave asciende radialmente desde la superficie de la Tierra bajo la gravedad terrestre y un empuje por unidad de masa

$$a(r) = \max\left(1, 1\frac{GM}{r^2}, g_0\right), \quad (1)$$

con  $GM = g_0 R_\oplus^2$  ( $g_0 = 9,80665\ \text{m/s}^2$ ,  $R_\oplus = 6.371\ \text{km}$ ), de modo que el empuje vale 1,1 g en la plataforma y pasa a  $g_0$  cuando  $1,1\ GM/r^2$  cae por debajo de  $g_0$ , a 311 km de altitud ( $r = R_\oplus\sqrt{1,1}$ ). La aceleración resultante es  $a(r) - GM/r^2$ : 0,1 g neta al inicio, que crece hasta prácticamente 1 g a medida que la gravedad terrestre desaparece. No hay atmósfera, arrastre, rotación de la Tierra, Sol ni Luna en esta fase (Sección 11). El sistema

$$\frac{dr}{d\tau} = v, \quad \frac{dv}{d\tau} = a(r) - \frac{GM}{r^2} \quad (2)$$

se integra por Runge–Kutta de cuarto orden con paso variable prescrito  $h = 0,02 + 5 \times 10^{-4} \tau$  (de 20 ms en el suelo a 43 s al final del día), guardando las tablas  $\tau$ ,  $r$ ,  $v$  y la aceleración. Como  $v \ll c$  durante todo el día (827 km/s al final), la fase se trata como newtoniana; la corrección relativista entra en dos integrales acumuladas junto con el estado: la *quema*  $b$  (rapidez acumulada por el empuje, Sección 7),

$$b(\tau) = \frac{1}{c} \int_0^\tau a(r(\tau')) d\tau', \quad (3)$$

integrada mediante la regla de Simpson en cada paso, y el tiempo de la Tierra  $t_\oplus$ , con la dilatación a primer orden en  $v^2/c^2$ ,

$$dt_\oplus = \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) d\tau, \quad (4)$$

evaluada con el promedio de  $v^2$  en los extremos del paso. Al final del día la nave está a 34,9 millones de kilómetros del centro de la Tierra, a 827 km/s, con  $t_\oplus - \tau = 0,107$  s. Entre los nodos de la tabla, el estado se interpola mediante polinomios de Hermite cúbicos usando las derivadas conocidas ( $v$  para  $r$ ,  $a$  para  $v$ ), lo que preserva la continuidad de  $r$ ,  $v$  y de la aceleración reportada.

## 2.2 Fase relativista: movimiento hiperbólico en forma cerrada

A partir de  $\tau_1 = 86.400$  s, la aceleración propia es constante,  $a = g_0$ , y la trayectoria es el movimiento hiperbólico de Rindler [1, 3]. Con la rapidez  $\eta$  definida por  $\beta = \tanh \eta$  y  $\gamma = \cosh \eta$ , la aceleración propia constante da

$$\eta(\tau) = \eta_1 + \frac{a}{c}(\tau - \tau_1), \quad (5)$$

con  $\eta_1 = \operatorname{artanh}(v_1/c) = 2,76 \times 10^{-3}$  la rapidez al final del ascenso. La posición radial y el tiempo de la Tierra siguen, para  $\tau_1 \leq \tau < \tau_F$ ,

$$r = r_1 + \frac{c^2}{a} \cdot 2 \sinh \frac{\eta + \eta_1}{2} \sinh \frac{\eta - \eta_1}{2}, \quad t_\oplus = t_1 + \frac{c}{a} \cdot 2 \cosh \frac{\eta + \eta_1}{2} \sinh \frac{\eta - \eta_1}{2}, \quad (6)$$

que son las identidades  $\cosh \eta - \cosh \eta_1 = 2 \sinh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$  y  $\sinh \eta - \sinh \eta_1 = 2 \cosh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$  escritas sin la resta de dos números casi iguales (Sección 10). La inversión ocurre en la rapidez  $\eta_F$  tal que el frenado simétrico, de  $\eta_F$  a cero, cubra exactamente la distancia restante hasta el destino  $D = 6.985$  al:

$$\cosh \eta_F = \frac{1}{2} \left[ \frac{a(D - r_1)}{c^2} + \cosh \eta_1 + 1 \right], \quad (7)$$

obtenida al igualar  $r(\eta_F) + (c^2/a)(\cosh \eta_F - 1) = D$ . En el frenado ( $\tau_F \leq \tau < \tau_{\text{fim}}$ ) la rapidez decrece linealmente,  $\eta = (\tau_{\text{fim}} - \tau) a/c$ , y la distancia que falta es

$$D - r = \frac{c^2}{a} \cdot 2 \sinh^2 \frac{\eta}{2}, \quad t_{\text{fim}} - t_\oplus = \frac{c}{a} \sinh \eta. \quad (8)$$

La Tabla 1 resume los valores. La escala  $c/a = 0,9687$  años es la constante natural del viaje: cada 0,9687 años de a bordo se añade una unidad a la rapidez; cada "9" adicional en la fracción de la velocidad de la luz cuesta el mismo tramo de cinta, como muestra la cinta de rapidez del panel de velocidad.

**Tabla 1.** Valores característicos de la trayectoria ( $a = g_0$ ,  $D = 6.985$  años luz).

| Magnitud                                          | Valor        | Observación                                                                          |
|---------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Fin del ascenso, $\tau_1$                         | 86.400 s     | $r_1 = 3,49 \times 10^7$ km, $v_1 = 827$ km/s, $\eta_1 = 2,76 \times 10^{-3}$        |
| Rapidez en la inversión, $\eta_F$                 | 8,8836       | $\gamma_F = 3.606,3$ ; $1 - \beta_F = 3,84 \times 10^{-8}$ (faltan 41,5 km/h para c) |
| Inversión, $\tau_F$                               | 8,6057 años  | $t_{\oplus} = 3.493,47$ años; $r_F = 3.492,5$ al                                     |
| Llegada, $\tau_{\text{fim}}$                      | 17,2114 años | 6.286,5 días de a bordo; $t_{\oplus} = 6.986,94$ años                                |
| Velocidad propia máxima, $\gamma\beta c$          | 7,23 UA/s    | distancia en el mapa de la Galaxia por segundo de a bordo                            |
| Recorrido contraído en la inversión, $D/\gamma_F$ | 1,94 al      | la ruta entera, medida a bordo                                                       |
| Quema total, $b_{\text{fim}}$                     | 17,7672      | razón de masas $e^b = 5,20 \times 10^7$ (Sección 7)                                  |

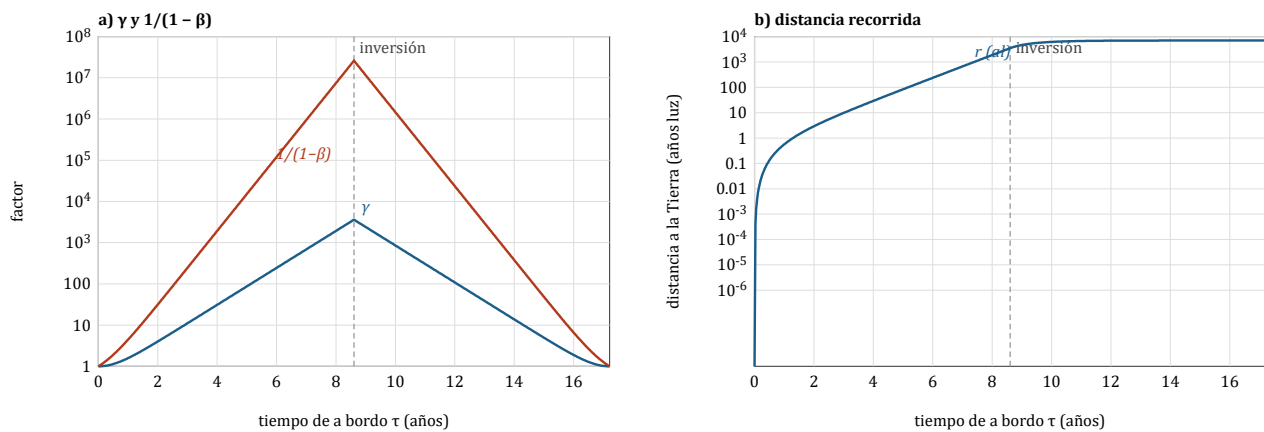


**Figura 1.** Cinemática del viaje en función del tiempo de a bordo, según las ecuaciones (5)–(8): (a) el factor de Lorentz  $\gamma = \cosh \eta$  y  $1/(1 - \beta) = (e^{2\eta} + 1)/2$  crecen exponencialmente hasta la inversión ( $\gamma = 3.606$ ;  $1 - \beta = 3,8 \times 10^{-8}$ ) y decrecen simétricamente durante el frenado; (b) la distancia a la Tierra en años luz, en escala logarítmica — la nave cruza 1 año luz a los 1,29 años de a bordo y la mitad del recorrido (3.492,5 al) en la inversión.

## 2.3 Estado instantáneo e hitos

Para cualquier  $\tau$ , la función de estado devuelve fase,  $\tau$ ,  $t_{\oplus}$ ,  $r$ ,  $v$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon = 1 - \beta$ , aceleración reportada y quema. Los hitos definidos por una distancia o por una magnitud física (escape de la gravedad terrestre, órbitas planetarias, 1 día luz, heliopausa, Nube de Oort, Burbuja Local, umbrales de temperatura del CMB, distancias de estrellas de referencia) se resuelven por bisección sobre la función de estado, con 200 iteraciones como máximo y parada cuando el punto medio coincide con un extremo en doble precisión; los hitos de duración fija y de calendario se construyen directamente. Un hito como "Distancia de Próxima Centauri" significa alcanzar, desde la Tierra, la distancia de esa estrella (4,25 al) — no pasar por ella. El mismo estado alimenta todos los paneles, el diario de a bordo, la radio y el cielo: no existe una segunda fuente de verdad.

## 3. Tiempo y señales

### 3.1 Relojes

El reloj de a bordo es el reloj real del visitante, alineado con el del servidor mediante el encabezado Date de una solicitud HEAD — una estimación de alineación, no una garantía: el encabezado tiene una resolución de 1 s, la red puede ser asimétrica y, si la solicitud falla, vale el reloj local — y  $\tau = t_{\text{ahora}} - T_0$ . El panel "Tierra adelante" muestra  $t_{\oplus} - \tau$  con unidad dinámica. Al inicio, la diferencia crece como  $a^2\tau^3/(6c^2)$ , por

(4): 1,8 attosegundos en el primer segundo, 1 picosegundo solo a los 82 s — por debajo de la resolución de la integración en doble precisión en los primeros segundos, lo que explica el piso en picosegundos del panel; en la llegada son 6.970 años de ventaja. La velocidad propia,  $\gamma\beta c$ , se muestra en el panel de velocidad: en la inversión la nave avanza 7,23 UA del mapa de la Galaxia por segundo de a bordo. El panel de navegación muestra la distancia que falta medida a bordo (la distancia en el sistema de referencia de la Tierra dividida por  $\gamma$ ) y cuánto ha acortado ya el camino la contracción; dividida por  $\gamma_F$ , la ruta entera tendría 1,94 años luz.

### 3.2 Sistemas de referencia de los relojes

En los instrumentos aparecen tres tiempos y conviene no confundirlos.  $\tau$  es el tiempo propio de la nave — el reloj de a bordo.  $t_\oplus$  es el tiempo coordinado del sistema de referencia inercial en el que la Tierra está en reposo, el "tiempo de la Tierra" del modelo;  $t_\oplus - \tau$  es la ventaja acumulada de ese reloj sobre el de a bordo, pero no es algo que la cámara trasera pueda mostrar: la imagen que llega fue emitida en  $t_\oplus - x/c$ , mucho antes (Sección 3.3), y la simultaneidad del sistema de referencia instantáneamente comóvil de la nave es otra construcción más, que no se usa en los paneles. Del mismo modo,  $\gamma\beta c$  es distancia en el sistema de referencia de la Tierra por segundo propio de la nave; localmente, nada supera  $c$ . La relatividad general queda fuera del modelo: la gravedad terrestre entra como fuerza newtoniana en el ascenso, pero no hay corrección gravitacional de los relojes. La escala de lo que se omite no es despreciable frente a la precisión exhibida: el potencial de la superficie terrestre ( $\Delta\Phi/c^2 \approx 7 \times 10^{-10}$ ) acumula  $\sim 150$  s en 6.987 años, y el del Sol a 1 UA ( $\approx 10^{-8}$ ),  $\sim 36$  min — el "tiempo de la Tierra" al segundo depende del sistema de referencia y del potencial elegidos [22].

### 3.3 Retardo de señales y horizonte de aceleración

El enlace con la Tierra se trata con la Tierra detenida en el punto de partida y luz en línea recta (la órbita terrestre, de 8 minutos luz, se desprecia frente a 6.985 años luz). Con  $x = r - R_\oplus$ , la imagen de la Tierra que llega a la nave en el estado  $(t_\oplus, x)$  fue emitida en  $t_\oplus - x/c$ , y una señal emitida por la nave llega a la Tierra en  $t_\oplus + x/c$ . Para quien acelera a  $g$  desde el reposo existe un horizonte: las señales emitidas en el origen después de  $t_\oplus = c/a = 0,9687$  años nunca alcanzan a la nave mientras esta acelera [3]. La simulación no impone este hecho; surge de (6): en la inversión, la luz que llega de la Tierra fue emitida apenas 0,9686 años después de la partida y tiene 3.492,5 años de antigüedad; en la llegada, fue emitida 1,937 años después de la partida.

La imagen de la Tierra, además de vieja, transcurre en cámara lenta y enrojecida por el factor Doppler trasero

$$D_{\text{ré}} = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} = e^{-\eta}, \quad (9)$$

igual a  $1/7.213$  en la inversión: un segundo de a bordo muestra  $1/7.213$  de segundo de la Tierra, y la luz llega 7.213 veces más roja. El Sol por la popa es un cuerpo negro de 5.772 K visto a  $T' = 5.772 e^{-\eta} = 0,80$  K en la inversión — más frío que el fondo cósmico — y una estación de FM en 100 MHz llegaría en 13,9 kHz. La cámara trasera muestra la fecha de emisión, la antigüedad de la luz y el factor de cámara lenta, calculados mediante estas expresiones.

### 3.4 Calendario

Los contadores de duración usan años de 365,25 días (31.557.600 s) y meses de un doceavo de año; las fechas se obtienen sumando  $\tau$  o  $t_\oplus$  al instante de partida — fijado en UTC (19/10/2026 15:00:00 UTC,

presentado como 12:00 UTC-3) — y se formatean en el huso horario local del visitante; el calendario del diario de a bordo usa el huso horario de Brasilia. No existe ninguna comunicación real: el panel calcula el retardo que tendría una señal; la radio de a bordo es ficción escrita para el trayecto (Sección 11).

## 4. Luz

### 4.1 Aberración

Cada fuente en reposo en el sistema de referencia de la Galaxia se ve desde la nave en una dirección aberrada. Con  $\theta$  el ángulo entre la fuente y la dirección del movimiento en el sistema de referencia de la Galaxia y  $\theta'$  el ángulo observado, la relación exacta es

$$\tan \frac{\theta'}{2} = e^{-\eta} \tan \frac{\theta}{2}, \quad (10)$$

la "fórmula del semiángulo" [4]. Se prefiere a la forma usual  $\cos \theta' = (\cos \theta + \beta)/(1 + \beta \cos \theta)$  porque permanece estable cuando  $\beta \rightarrow 1$ :  $\tan(\theta/2)$  se calcula como  $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$  para el hemisferio delantero y  $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$  para el trasero, sin cancelación, y el factor  $e^{-\eta}$  comprime el hemisferio delantero ( $\theta < 90^\circ$ ) en un cono de radio angular  $2 \cdot \text{atan}(e^{-\eta}) \approx 2e^{-\eta}$  alrededor de la proa; la dirección exactamente trasera sigue atrás. En la inversión, el hemisferio delantero cabe en un círculo de  $0,016^\circ$  de radio — lo que el panel de aberración llama "la mitad del cielo en un círculo de  $\theta'$ ". La misma fórmula, invertida, se usa para la nebulosa, la Vía Láctea difusa y la Tierra: se integra el rayo en el sistema de referencia en reposo y se transforma la radiancia al final.

### 4.2 Doppler: color y brillo

El factor Doppler de una fuente vista en la dirección  $\theta'$  es  $D = 1/[\gamma(1 - \beta \cos \theta')]$ . Para  $\gamma \sim 10^3$ , la expresión  $1 - \beta \cos \theta'$  pierde dígitos cerca de la proa — de forma medible en doble precisión y severa en el float32 del shader, cuyo épsilon de máquina ( $6 \times 10^{-8}$ ) supera  $1 - \beta$  en la inversión; la implementación usa la forma equivalente

$$D = \frac{1}{\gamma \left[ \varepsilon + 2\beta \sin^2 \left( \frac{\theta'}{2} \right) \right]}, \quad \varepsilon = 1 - \beta = \frac{2}{e^{2\eta} + 1}, \quad (11)$$

en la que  $\varepsilon$  se obtiene directamente de la rapidez, sin restar  $\beta$  de 1 (Sección 10). Una estrella tratada como cuerpo negro de temperatura  $T$  aparece como cuerpo negro de temperatura  $T' = D \cdot T$ ; una línea de emisión de longitud de onda  $\lambda$  aparece en  $\lambda' = \lambda/D$ ; el flujo de una fuente puntual escala con  $D^2$  y la radiancia de una fuente extensa con  $D^4$  [5]. Para las estrellas del catálogo HYG, que tienen velocidad propia, el Doppler de la estrella respecto del sistema de referencia de la Galaxia se incluye en el mismo logaritmo. De estas tres reglas, aplicadas a cada estrella, surge el arco estelar: delante, las estrellas frías (3.000–4.000 K) desplazadas por  $D \sim 2$ –3 se vuelven blancas y azules, las calientes desaparecen en el ultravioleta, y el cielo de atrás se apaga y enrojece.

### 4.3 Espectros, colores y catálogos

Los espectros estelares son cuerpos negros. La conversión de temperatura a color usa las funciones de igualación CIE 1931 en el ajuste analítico de Wyman, Sloan y Shirley [6], integradas numéricamente con la ley de Planck entre 360 y 830 nm, y la matriz XYZ→sRGB lineal; el resultado es la fracción de la potencia bolométrica que cae en cada canal, tabulada en 1.024 temperaturas de  $\log_{10} T = 0,5$  a 9,5 y muestreada en el shader con interpolación (sin escalones de color). La radiancia de una estrella de luminosidad visual  $L_V$  a

una distancia  $d$  es  $L_V/d^2$  en unidades de  $L_\odot/(4\pi \text{ al}^2)$ , con la temperatura del HYG estimada por el color B-V (Ballesteros 2012 [7]; B-V = 0,65 cuando falta) y la del suplemento Gaia por clase espectral.

El catálogo tiene 299.858 estrellas: las 109.400 del HYG v4.1 [8], con posiciones, velocidades y época J2000, y 190.458 seleccionadas de la distribución Gaia EDR3/Hipparcos/Tycho preparada para Celestia [9] ( $V < 9$  a lo largo de la ruta,  $V < 9$  en la Tierra o  $V < 13$  a  $15^\circ$  del destino), deduplicadas por HIP/HD. Las posiciones son tridimensionales, de modo que el paralaje a lo largo de la ruta es geométrico, no escenificado. Para el HYG, la posición exhibida es la retardada: se resuelve, por iteración de punto fijo, el instante de emisión  $t_e$  tal que la luz emitida en  $p + v \cdot (t_e - \text{época})$  llegue al observador en el año en curso, anclando la solución a la posición observada en la época del catálogo. No hay centelleo, luz zodiacal ni lentes gravitacionales.

#### 4.4 Extinción interestelar

El polvo es un disco axisimétrico explícito, con profundidad óptica integrada entre observador y fuente,

$$\tau = K \int_0^d e^{-|z|/H} ds, \quad K = 5,1 \times 10^{-4} \text{ al}^{-1}, \quad H = 330 \text{ al}, \quad (12)$$

con el Sol a 65 al del plano;  $K$  equivale a 0,55 magnitudes por cada mil años luz en el plano. La integral tiene forma cerrada a lo largo de un segmento recto (apéndice A). La extinción se aplica de forma *diferencial*: la magnitud de catálogo ya incluye la extinción hasta la Tierra, por lo que se resta la profundidad óptica Tierra-estrella y se suma la nave-estrella, para que una estrella conserve su brillo medido mientras la nave está cerca de la Tierra. La dependencia espectral usa factores  $\exp(-\{-0,18; 0; 0,30\} \cdot \tau)$  en los canales R, G y B. El brillo difuso de la Vía Láctea es un modelo de disco con densidad  $0,055 \cdot e^{-R/8500} \cdot e^{-|z|/700}$  (años luz), espectro de 5.000 K y centro galáctico a 26.670 al, integrado en 28 pasos logarítmicos hasta 72.000 al, con el mismo polvo; las Nubes de Magallanes, M31 y M33 son nubes de partículas con la forma aproximada. Las consultas al mapa tridimensional Bayestar no respondieron durante la preparación, de modo que no se representa ninguna nube real de polvo (Sección 11).

#### 4.5 Exposición fija, PSF y conversión para la pantalla

El renderizador es HDR: el flujo de cada estrella se acumula en un *buffer* de media precisión, en unidades físicas, con una ganancia fija  $E$  elegida una sola vez ( $E_{\text{oscuro}} = 5.400$  en la calibración de referencia de 1.200 px/rad, escalada con  $(\text{px/rad})^2$  para que el brillo sea independiente de la resolución). Una estrella no resuelta se dibuja como gaussiana compacta,  $\sigma = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{px/rad})$ , sin disco luminoso artificial; un disco físico solo aparece cuando el radio angular aberrado supera 1,2 px. La conversión para la pantalla es una compresión SDR fija, no un ojo simulado ni una exposición automática:

$$m = \text{mix}\left(\frac{c(1 - e^{-L})}{L}, 1 - e^{-c}, s\left(\frac{L}{L_0}\right)\right), \quad m' = 1,03 \frac{m^2}{m + 0,03}, \quad \text{salida} = m'^{1/2,2}, \quad (13)$$

en la que  $c$  es el color lineal,  $L$  su luminancia y  $s(L)$  una transición suave entre 1,5 y 12 que pasa de preservar el matiz a saturar por canal. Con esta calibración, en reposo aparece toda estrella hasta la magnitud 7 y el límite de renderizado queda en la franja de la magnitud 8 — el criterio es un píxel por encima de un umbral fijo de brillo en la pantalla, verificado por una réplica en CPU del shader sobre el catálogo (Sección 10). Tomando la magnitud 8,0 como referencia aproximada y 6,5 como referencia de observación a simple vista en cielo oscuro, la diferencia corresponde a fuentes con cerca de cuatro veces menos flujo ( $10^{0,4 \cdot 1,5} \approx 4$ ). Esta comparación caracteriza la exposición elegida; no constituye una calibración de la visión humana. Los conteos — cerca de 56.000 estrellas renderizadas en el cielo entero,

frente a ~9.000 visibles a simple vista — se refieren al cielo entero y no miden sensibilidad. La cámara trasera usa la misma ganancia.

#### 4.6 Tierra, atmósfera y base de lanzamiento

La Tierra se dibuja como una esfera texturizada con el compuesto Blue Marble: Next Generation de enero de 2004 ( $2.048 \times 1.024$ ) [20] y la cobertura de nubes Blue Marble Clouds, esta última con detalle procedural continuo en dos capas esféricas (1,5–3,8 km y 8,5–9,3 km de altitud) para que el acercamiento de la cámara no revele píxeles. La superficie recibe la luz solar con el terminador del instante de partida y un halo atmosférico de dispersión simple; el cielo diurno visto desde la base se oscurece entre 50 y 100 km de altitud, por elección visual, y mantiene el limbo iluminado. La base es escenografía: latitud igual a la declinación de M16 ( $-13,88^\circ$ , impuesta por el eje de la ruta), longitud visual fija en  $-39,02^\circ$ , cámara a 35 m, torre de 112 m, litoral y río procedurales; los detalles de la base desaparecen a 12 km y el conjunto a 90 km. La orientación de la Tierra exhibida no gira (Sección 11). Cuando la Tierra se reduce a menos de 1,2 px de radio aparente pasa a ser un punto, un cuerpo negro de 5.772 K con luminosidad  $1,36 \times 10^{-10} L_\odot$  y un tinte azulado, y la Tierra de la escena oculta la estrella que quede detrás del disco.

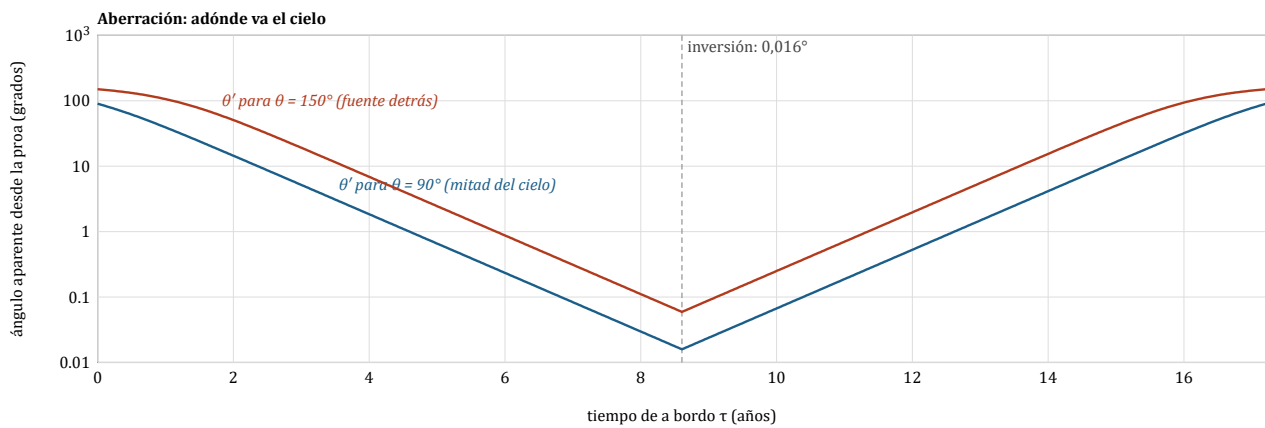


**Figura 2.** Ángulo aparente, medido desde la proa, de una fuente que en el referencial de la Galaxia está a  $90^\circ$  (borde de la mitad del cielo) y de una fuente a  $150^\circ$ , casi detrás de la nave, según la ecuación (10):  $\tan(\theta'/2) = e^{-\eta} \tan(\theta/2)$ . Con 1 año de a bordo la mitad del cielo ya cabe en  $39^\circ$ ; con 3 años, en  $7^\circ$ ; en la inversión, en  $0,016^\circ$  — y la fuente de atrás aparece a  $0,06^\circ$  de la proa.

#### 5. Fondo cósmico de microondas

El CMB es un cuerpo negro a  $T_0 = 2,7255$  K [10] en el sistema de referencia en el que es isótropo. Para un observador en movimiento, cada dirección sigue presentando un espectro de cuerpo negro, con temperatura

$$T(\theta) = \frac{T_0}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)}, \quad (14)$$

$\theta$  medido a partir de la dirección del movimiento [11]. La nave parte del Sistema Solar, que ya se mueve a 369,82 km/s en dirección a  $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$  respecto del CMB [10]; el boost de la nave se compone con ese dipolo: el eje y la rapidez efectiva del sistema de referencia del CMB visto desde la nave se obtienen componiendo las dos velocidades, con el cuidado de calcular  $\gamma$  y  $|\gamma\beta|$  como  $e^{-\eta}$  para evitar la cancelación. La temperatura en una dirección  $d$  es entonces  $T_0/(e^{-\eta_{ef}} + \frac{1}{2}|\gamma\beta|_{ef}|d - eje|^2)$ , donde  $|d - eje|^2 = 2(1 - \cos \theta)$  es estable en el ápice. En la proa, en la inversión,  $T = 19.652$  K.

La radiancia de cada dirección es la ley de Planck integrada en el visible con las funciones CIE, tabulada en 2.048 temperaturas de 300 a 50.000 K en escala logarítmica. La mancha óptica se integra sobre el área de cada píxel con cuadratura de Gauss de 4 puntos y subdivisión adaptativa (hasta seis niveles) del núcleo, cuyo ancho angular  $\sim 2e^{-\eta}$  rad se compara con el píxel independientemente de la resolución; así, un ápice menor que un píxel conserva su energía al cruzar la frontera entre píxeles o al cambiar de resolución. Por debajo de 300 K de pico, la cola visible es inferior a  $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  y la mancha no se calcula. El resultado se suma en punto flotante de 32 bits antes de la compresión (13) y *no* es atenuado por el polvo de los Pilares, que es transparente en microondas en el sistema de referencia del polvo.

La irradiancia sobre una placa orientada hacia la proa,  $\int \sigma T(\theta)^4 / \pi \cdot \cos \theta \, d\Omega$  sobre el hemisferio frontal, se tabula en  $\eta$  con pasos logarítmicos en  $\theta$  (el cono caliente tiene un ancho  $\sim 1/\gamma$ ): vale  $\sigma T_0^4 = 3,1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$  en reposo y tiende a  $(16/3)\gamma^2 \sigma T_0^4$ , la componente  $T^{0x}$  de la radiación transformada; en la inversión vale  $217 \text{ W/m}^2$ , y los dos límites se verifican en las pruebas. La Tabla 2 da los hitos de temperatura; la misma irradiancia, convertida por la fracción visible del cuerpo negro, ilumina la cabina (5,4% de la luz solar visible en la inversión).

**Tabla 2.** Temperatura del fondo cósmico en la proa a lo largo del viaje.

| Temperatura en la proa            | Primer cruce (años de a bordo) | Tiempo total por encima del valor (años) |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|
| 300 K (inicio del cálculo óptico) | 4,55                           | 8,11                                     |
| 1.000 K                           | 5,72                           | 5,77                                     |
| 2.000 K                           | 6,39                           | 4,43                                     |
| 5.000 K                           | 7,28                           | 2,65                                     |
| 10.000 K                          | 7,95                           | 1,31                                     |
| 19.652 K (pico, inversión)        | 8,61                           | —                                        |

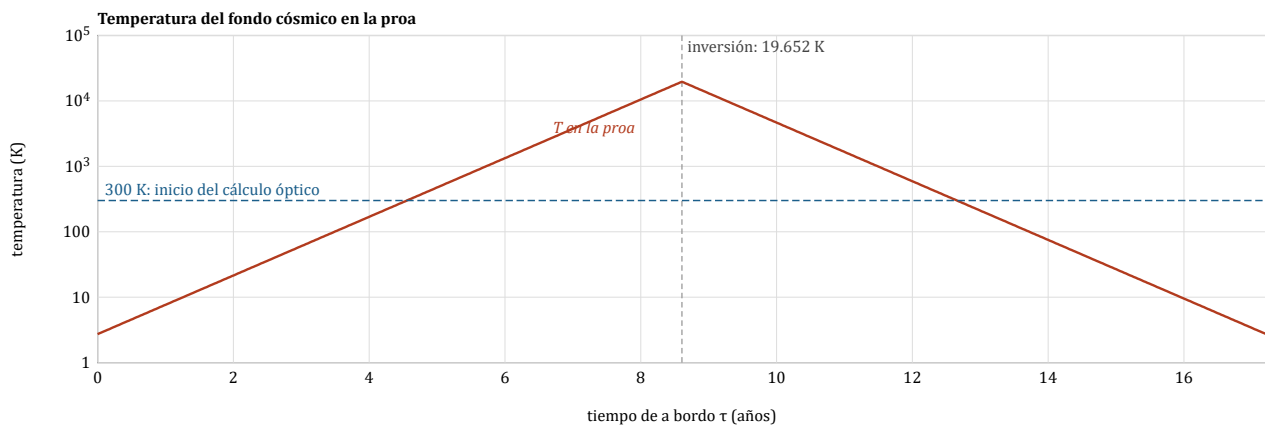


**Figura 3.** Temperatura de cuerpo negro del fondo cósmico en la dirección de la proa,  $T = T_0 e^{\eta}$  (corregida por el dipolo solar), según la ecuación (14): sube un factor  $e$  cada 0,97 años de a bordo, supera los 300 K a los 4,55 años — cuando empieza a calcularse la mancha óptica — y llega a 19.652 K en la inversión, para caer simétricamente durante el frenado.

## 6. Nebulosa del Águila: datos y reconstrucción

### 6.1 Datos

La geometría en el plano del cielo proviene de dos fotografías públicas [12, 13]: ESO0926a (campo amplio de  $32'$ , filtros B, V y R, CC BY 4.0) proporciona la estructura del campo amplio; Hubble heic1501a (los Pilares, CC BY 4.0), registrada por correlación con la primera (rotación de  $35^\circ$ ), interviene en las

estructuras menores que 0,08 al. Las direcciones de las estrellas de NGC 6611 provienen de SIMBAD y se cotejaron, en segundos de arco, con el WCS de la imagen ESO; las temperaturas (32.000–41.500 K) y luminosidades de ocho sistemas provienen de la Tabla 5 de Sana et al. [14], con las binarias no resueltas tratadas como una sola fuente. Las razones de quince líneas ópticas relativas a H $\beta$  (H $\alpha$ /H $\beta$  = 4,343) provienen del espectro de ejemplo de McLeod et al. [15], obtenido con MUSE, y la emisividad H $\alpha$  usa el coeficiente de recombinación  $3,56 \times 10^{-25} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}$ , cotejado mediante la relación entre medida de emisión y brillo Rayleigh. La profundidad proviene de una malla de referencia para impresión 3D (NASA/STScI), escalada por 1,725 para coincidir con la silueta registrada: altura de los Pilares 8,625 al, caja de  $6,39 \times 10,53 \times 9,81$  al, rejilla de  $142 \times 234 \times 218$  celdas. Todas las dimensiones transversales son ángulos medidos multiplicados por la distancia adoptada, 7.000 al al centro de M16 y 6.992 al al plano de los Pilares; la profundidad es supuesta (Sección 6.2).

## 6.2 Modelo de transporte

El realce de divulgación de las fotografías se deshace mediante una ley de potencia de exponente 2,4 (hipótesis) y la imagen resultante se descompone en una envolvente de emisión (máximo suave en 0,7 al) y una profundidad óptica fotográfica de hasta  $\tau_f = 4,5$ , convertida en la profundidad óptica adoptada por el modelo mediante  $\tau_v = \min[8, \tau_f(1 + 2,6 \tau_f)]$  — una regla declarada, no una medición independiente. Las capas son láminas con espesor: la emisión de recombinación en una lámina centrada 15 al detrás del plano de los Pilares ( $\sigma = 3$  al, piso de 2%), las franjas y la nube madre a 8,5 al ( $\sigma = 2$  al), las estrellas del cúmulo en un plano común 3,2 al detrás del plano de los Pilares. La luz vista sobre un absorbente se trata como un velo emitido en una capa de 0,1 a 1,4 al delante de él, con el espectro de fondo. La dispersión de la luz estelar usa albedo 0,5 y función de fase de Henyey–Greenstein con  $g = 0,6$ ; la opacidad  $\kappa = 6 \text{ al}^{-1}$ ; el continuo dispersado es un cuerpo negro de 37.755 K. El brillo absoluto está fijado por una única medida de emisión,  $10^5 \text{ cm}^{-6} \cdot \text{al}$  ( $\approx 100 \text{ e}^-/\text{cm}^3$  en 10 al), un valor plausible, en el extremo superior.

El transporte es una marcha de rayos en el sistema de referencia en reposo de la nebulosa, con 224 muestras (24 delante, 160 en el intervalo fino de las franjas y de los Pilares, 40 detrás): la emisión de líneas, el continuo dispersado y la absorción gris se integran en orden a lo largo del rayo; la radiancia se transforma por Doppler y aberración al final (las líneas desplazadas por  $\lambda/D$  salen del visible en la aproximación — H $\alpha$ , de 656 nm, está en 234 nm al 77% de c); la pasada guarda, además de la radiancia premultiplicada, la profundidad de salida (codificada como  $\log_2(1 + d)/34$ , la misma de la pasada de las estrellas) y la profundidad óptica acumulada en cuatro puntos, de modo que las estrellas situadas detrás del material sean atenuadas por lo que de hecho está delante de ellas. El nivel de detalle de las texturas se elige según el ángulo en reposo por píxel aparente, que crece con el factor Doppler: la nebulosa nunca gana más detalle angular que el que tiene el plano fotográfico, ni presenta aliasing cuando está lejos. La distribución volumétrica adoptada no está determinada unívocamente por las observaciones: la espectroscopía proporciona restricciones sobre velocidades, densidad electrónica, extinción y geometría relativa de los Pilares [15], pero no establece el campo tridimensional completo de densidad y emisividad usado aquí; las posiciones y espesores de las capas, el plano común de las estrellas y la profundidad atribuida a la malla son hipótesis documentadas del modelo. La Sección 11 resume lo que en este modelo es hipótesis.

## 7. Propulsión, energía y el flujo en el escudo

### 7.1 Cohete de fotones

Se adopta un cohete de fotones perfecto: toda la masa de combustible se convierte en radiación colimada en el sentido opuesto al empuje. Para este propulsor, la ecuación del cohete relativista da  $m(\tau) = m_{\text{fim}} e^{b_{\text{fim}}}$

$-b(\tau)$ , donde  $b$  es la rapidez acumulada por el empuje, (3):  $b = b_1 + \eta - \eta_1$  en la aceleración y  $b = b_F + \eta_F - \eta$  en el frenado, con  $b_F = b_1 + \eta_F - \eta_1$  y  $b_1 = 2,83 \times 10^{-3}$  la quema del ascenso. Con masa seca  $m_{\text{fim}} = 100$  t:

$$m_0 = m_{\text{fim}} e^{b_{\text{fim}}} = 5,20 \times 10^9 \text{ t}, \quad E_{\text{comb}} = m_{\text{fim}} (e^{b_{\text{fim}}} - 1) c^2 = 4,68 \times 10^{29} \text{ J}, \quad (15)$$

lo que el Sol emite en 1.221 s. La potencia del haz, en el sistema de referencia instantáneo de la nave, es  $P = m \cdot a_{\text{emp}} \cdot c$ . Al inicio del despegue, con un empuje de 1,1 g, vale aproximadamente  $1,68 \times 10^{22}$  W; a modo de comparación, la referencia  $P_{\text{ref}} = m g_0 c$  adoptada en el modelo vale  $1,53 \times 10^{22}$  W con la masa inicial. Durante el frenado a 1 g, la potencia pasa de  $2,1 \times 10^{18}$  W en la inversión a  $2,9 \times 10^{14}$  W inmediatamente antes de la parada, cuando se apaga el motor; en el frenado el haz apunta hacia delante respecto del movimiento. La fracción de combustible usada es  $(1 - e^{-b})/(1 - e^{-b_{\text{fim}}})$  y la reserva llega a cero exactamente en la parada; el panel de sistemas muestra la reserva, y el formateo usado por la radio de a bordo la calcula directamente,  $e^{-b}(1 - e^{b - b_{\text{fim}}})/(1 - e^{-b_{\text{fim}}})$ , para no perder los últimos dígitos por cancelación, componiendo los dos porcentajes en aritmética decimal entera (la suma cierra en 100% sin redondear la reserva a cero antes del final). Un haz colimado no se ve lateralmente en el vacío sin algún mecanismo de dispersión; en el medio interestelar, su apariencia dependería del espectro del haz y de las propiedades y la distribución del gas y del polvo. El simulador no calcula esa dispersión; por eso se omitió su contribución visual — no hay penachos ni destellos — y el frenado lo indican los instrumentos.

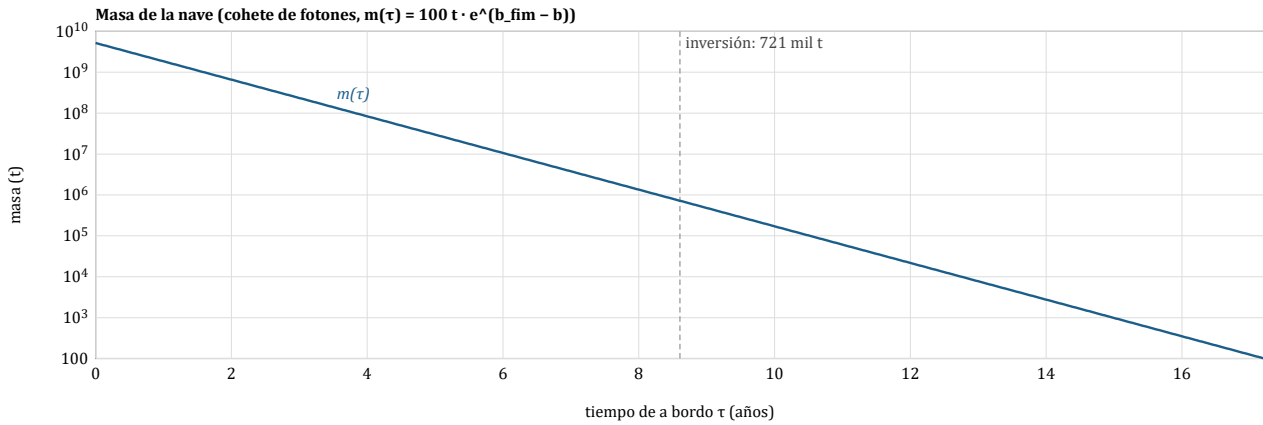


**Figura 4.** Masa total de la nave a lo largo del viaje para el cohete de fotones ideal con 100 t de masa seca:  $5,20 \times 10^9$  t en la partida,  $7,21 \times 10^5$  t en la inversión y 100 t en la parada; en escala logarítmica la curva es una recta en cada tramo, porque el quemado  $b$  es la propia rapidez acumulada.

## 7.2 Medio interestelar y escudo

El gas interestelar llega a la proa como un haz de protones de energía cinética  $(\gamma - 1)m_p c^2$ , con densidad  $\gamma n$  en el sistema de referencia de la nave. El flujo de energía sobre una superficie normal al movimiento es

$$W = n c m_p c^2 \beta \gamma (\gamma - 1) = n c m_p c^2 \sinh \eta \cdot 2 \sinh^2 \frac{\eta}{2}, \quad (16)$$

escrito en la segunda forma para evitar  $\gamma - 1$  a baja velocidad. Con  $n = 0,1 \text{ cm}^{-3}$ , la densidad de la Burbuja Local adoptada para todo el viaje,  $W = 5,9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$  en la inversión (3,4 TeV por protón), cerca de 930 veces la emitancia de la superficie del Sol; la temperatura de equilibrio radiativo de una cara,  $(W/\sigma)^{1/4}$ , es  $\sim 32.000$  K. El bloque ESCUDO del panel de sistemas muestra estas magnitudes y supone un escudo capaz de soportarlas. Semyonov [16, 17] muestra que el gas recibido es la fuente de radiación dominante de un vuelo relativista, por encima de los rayos cósmicos, y que impone un blindaje real; la simulación no modela dosis, erosión por polvo ni radiación secundaria (Sección 11).

## 8. Encuentros escenográficos

### 8.1 Posiciones y velocidades

En una recta de la Tierra a M16, la nave no pasaría cerca de ningún cuerpo del Sistema Solar. Para que el viaje tuviera algo que mostrar en los primeros días, la Luna, Marte, Ceres, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón se colocan en el punto en el que la nave cruza el radio orbital medio de cada uno, en lados alternos de la ruta, a 1,5 radios del centro (Saturno a 1,55 R y 0,18 R por encima del plano de los anillos; Urano a 1,5 R, por la abertura entre la primera y la segunda franja, con más de 300 km de margen); las lunas de Júpiter tienen radios reales (1.821, 1.560 y 2.634 km) en posiciones fijas, Caronte (606 km) está a (9.000; 5.000; 12.000) km de Plutón — 15.800 km, un 20% menos que la separación real de ~19.600 km — y el cinturón de asteroides está representado por veinte rocas de 20–92 km. El instante de cada sobrevuelo es el hito físico del radio orbital (Apéndice B), y la velocidad es la de la trayectoria: el desplazamiento por cuadro es  $\gamma\beta c\Delta\tau$  — la Luna cruza el diámetro en 41 s a 307 mil km/h; Plutón pasa a 38,7 millones de km/h, en 0,22 s. No hay cámara lenta, asistencia gravitatoria ni perturbación de la ruta.

### 8.2 Representación

Los cuerpos son esferas texturizadas (Solar System Scope, CC BY 4.0, con rellenos de regiones no observadas; Plutón de New Horizons con lagunas; Ceres ficticio) iluminadas desde una dirección fija, normaliza(-0,48; 0,65; -0,90), y no por el Sol — la fase exhibida no es la real. La aberración se aplica a la posición y al tamaño angular de cada cuerpo, pero no hay desplazamiento Doppler de color ni ganancia  $D^4$  sobre las texturas: en los sobrevuelos planetarios  $\beta \leq 0,036$ , lo que omite hasta un 3,7% de desplazamiento espectral y hasta un 15,5% de ganancia de radiancia ( $D^4$ ) para un cuerpo situado delante; en la Nube de Oort  $\beta = 0,25$  y el factor  $D \approx 1,3$  ya casi triplicaría la radiancia. Los anillos de Saturno son material sintético con franjas C (1,275–1,58  $R_S$ ), B (1,58–2,018), división de Cassini (2,018–2,10), A (2,10–2,349) y Encke (2,291–2,297), con  $R_S = 58.232$  km en la escena: en kilómetros, los bordes quedan a 74.246 (C interior; NASA 74.658), 92.007 (C/B; 91.975), 117.512 (B exterior; 117.507), 122.287 (A interior; 122.340) y 136.787 km (A exterior; 136.780) — diferencias de hasta 0,55%; lo que es sintético es la textura. Los anillos de Urano son siete franjas escenográficas centradas de 1,62 a 2,07  $R_U$  en pasos de 0,075  $R_U$ , con anchos de 400 a 1.500 km, ampliados para que sean visibles: los anillos reales tienen de 1 a 10 km de ancho (el  $\epsilon$ , de 20 a 100 km). Tienen transparencia y sombra, sin emisión propia.

### 8.3 Nube de Oort y Burbuja Local

A partir de 2.000 UA del Sol (día 90,2 de a bordo,  $\beta = 0,25$ ), un tramo de 24 horas de a bordo presenta nueve grupos de tres cuerpos helados de 35 a 125 km, con textura lunar, que pasan hasta a 4.500 km de la nave entre las 00h00 y las 23h52 de a bordo; el fin del día cierra solo la secuencia — el modelo sitúa la salida de la nube a 100.000 UA, en el día 574. La nube real es inferida, no observada; los cuerpos de más de 1 km distan decenas de UA entre sí, y la probabilidad de pasar a 10 mil kilómetros de uno de ellos en 24 horas es esencialmente nula. La "pared" de filamentos de la Burbuja Local es una transición gaussiana ( $\sigma = 0,003$  al) en 300 al, dibujada en coordenadas de pantalla con ruido fractal, sin Doppler ni aberración; la burbuja real es gas caliente, invisible en el óptico y sin borde nítido, y a 300 al la nave ya está a  $\gamma \approx 310$ . Los hitos heliosféricos (choque de terminación a 90 UA, heliopausa a 120 UA, Voyager 1 a 165 UA más 3,57 UA/año desde 2025, cinturón de Kuiper a 40 UA) son valores redondeados, medidos como distancia al Sol.

## 9. Instrumentos, diario y radio de a bordo

### 9.1 Paneles

Todos los paneles son funciones puras del estado (Sección 2.3), formateadas en módulos sin acceso al documento y probadas en Node. El panel de velocidad muestra la velocidad en km/h, la fracción de  $c$  con al menos dos dígitos significativos de la diferencia respecto del 100% (99,9999962% en la inversión), la velocidad propia  $\gamma\beta c$  en unidades dinámicas (km, mil km, millones de km, UA por segundo de a bordo) y la *cinta de rapidez*: como  $\eta$  crece al mismo ritmo cada día de a bordo, la nave avanza por la cinta a paso constante, y las marcas de 50%, 90%, 99%, ... 99,99999% de  $c$ , en  $\eta = \frac{1}{2} \ln((2 - \epsilon)/\epsilon)$ , quedan casi equidistantes. El panel del tiempo muestra la ventaja de la Tierra,  $t_{\oplus} - \tau$ , en una escala de fondo 1-2-5 con unidad dinámica a partir de picosegundos (por debajo de eso, la diferencia queda bajo la resolución de la integración en los primeros segundos) y el factor  $\gamma$  en escala logarítmica; la masa, también en escala logarítmica, está en el panel "Masa y combustible", junto a la reserva. El mapa de navegación tiene un ciclo de 64 s: 10 s en la vista general, 2 s de acercamiento, 50 s en la vista local y 2 s de retorno, y la nave sigue desplazándose sobre la regla durante las transiciones. La vista general mapea la posición mediante  $X = \frac{1}{2} \ln(1 + k u)/\ln(1 + k)$  antes de la inversión, con  $u = (r - R_{\oplus})/(r_F - R_{\oplus})$  y  $k = 10^{12}$ , y mediante  $X = 1 - \frac{1}{2} \ln(1 + k w)/\ln(1 + k)$  después, con  $w = (D - r)/(D - r_F)$  evaluado por (8): la regla pasa de distancia recorrida a distancia restante en la inversión, y tanto los primeros kilómetros como los últimos años luz quedan visibles; la Tierra y Plutón son referencias fijas del Sistema Solar, con el próximo encuentro destacado. La vista local muestra dos hitos — el anterior y el próximo, con distancias redondeadas en la unidad exhibida y prioridad para los encuentros — y, cuando el hito está lejos, una referencia absoluta redondeada con incrementos locales, para que el movimiento siga siendo perceptible; las lecturas inferiores difieren entre las dos vistas, y la distancia a bordo hasta la parada es la distancia restante dividida por  $\gamma$ . El panel de radiación dibuja  $\lambda B_{\lambda}$  normalizado a su propio pico para el Sol por la popa y el CMB por la proa, y compara, en una franja de energía, la irradiancia solar  $L_{\odot}/(4\pi d^2) \cdot D^2$  con la irradiancia del CMB en la proa (Sección 5): el fondo cósmico supera al Sol antes del primer año de a bordo; en la inversión son 217 W/m<sup>2</sup> frente a  $5,4 \times 10^{-22}$  W/m<sup>2</sup> del Sol por la popa — un factor  $\approx 4 \times 10^{23}$  — y, en la llegada, con la nave detenida,  $\approx 5 \times 10^8$ . La cámara trasera compone la Tierra o el Sol con la fecha de emisión, la antigüedad de la luz y el factor de cámara lenta (9); la ventana frontal y la trasera se actualizan a 10 y 5 Hz en el crucero.

### 9.2 Luz de la cabina

La cabina es una imagen única con tres capas de luz calculadas: un ciclo circadiano (día de 07 h a 19 h, noche de 22 h a 05 h al 55% con tinte cálido, rampas entre ellos) en multiplicación; la luz que entra por la ventana, en adición — la suma de la luz diurna de la Tierra durante el ascenso ( $0,15 \cdot e^{-h/8.500 \text{ m}}$ ) con la irradiancia del CMB convertida por la fracción visible del cuerpo negro a la temperatura de la proa y normalizada por 550 W/m<sup>2</sup>, lo que da 0,32% de la luz solar visible a los 7 años y 5,37% en la inversión (una aproximación de iluminación: la temperatura del CMB varía con la dirección y el coeficiente usa la de la proa); y un reflejo del vidrio, cuya opacidad  $0,09 \cdot \text{nivel}/(1 + \text{luz externa}/0,005)$  cede cuando hay luz exterior. La placa del constructor y las sombras de la cabina siguen estas capas; no hay fotometría calibrada.

### 9.3 Diario y radio

El diario de a bordo se genera mediante módulos de hitos que reciben la función de estado y un resolovedor por bisección: cada hito (escape, órbitas, 1 día luz, heliopausa, Oort, temperaturas del CMB, semiángulo de aberración, "+100 años en la Tierra", estrellas de referencia como Próxima, Sirio, Vega y Betelgeuse, umbrales de velocidad, inversión, llegada) es un instante  $\tau$  calculado, no escrito a mano, y 108 datos de

contexto acompañan a los hitos con la fuente anotada en el código. La radio de a bordo es una franja de noticias con 2.415 frases preescritas (241 originales y 2.174 de una ampliación), de tres voces — la Borealis y dos empleados ficticios, Doña Carmen, de la Dirección de Cumplimiento e Integridad Patrimonial, y Don Beto, de Soporte Operativo y Contingencias. Los comentarios del catálogo siguen una restricción editorial sobre los dígitos, con excepciones para "1 g" y "24 h/24 horas"; el analizador también preserva el lema aprobado de la nave. Los números escritos con letras se permiten en el humor administrativo, pero no para introducir datos físicos. Los valores de los informes provienen de la simulación; la revisión editorial y las pruebas verifican que los comentarios no inventen lecturas ni averías ni contradigan los hitos. La distribución es determinista: cada frase tiene fase de vuelo y tema, se selecciona por el hito anterior o el próximo y por ventanas de proximidad, no se repite antes de 15 min (historial de las 24 últimas), y las respuestas de los personajes expiran en 5 min o cuando cambia la fase; los mensajes que quedaron desactualizados se descartan. No hay generación de texto por IA en tiempo real.

## 10. Implementación y robustez numérica

### 10.1 Arquitectura

La aplicación es estática: HTML, CSS, JavaScript (módulos ES) y WebGL2, sin bibliotecas de ejecución. La función de estado (Sección 2) es pura y determinista; el bucle de cuadros lee el reloj, calcula el estado y actualiza paneles, cielo, cámara trasera y radio. El cielo usa una pasada HDR de puntos (estrellas, con PSF gaussiana y disco físico cuando están resueltas), una pasada de fondo (Vía Láctea difusa, Tierra, atmósfera), una pasada volumétrica para la nebulosa (media resolución hasta que los Pilares ocupan más de 40 px) y una pasada final de composición que suma el CMB en 32 bits y aplica (13). Las tasas de cuadros se eligen por fase: 60 Hz en sobrevuelos cercanos, 30 Hz en los dos primeros días, 10 Hz en el crucero (5 Hz en la cámara trasera), porque en el crucero nada cambia a escala de cuadro.

### 10.2 Formulaciones estables

Varias magnitudes del viaje tienen razones del orden de  $10^7$ – $10^{19}$  entre la partida y la inversión, y la doble precisión ( $2^{-52} \approx 2,2 \times 10^{-16}$ ) no basta para las formas ingenuas. Las decisiones:

- **Rapidez como variable de estado.**  $\eta$  es lineal en  $\tau$  (5);  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\varepsilon = 1 - \beta$  se derivan de ella:  $\varepsilon = 2/(e^{2\eta} + 1)$  evita la cancelación de  $1 - \tanh \eta$  (que se satura en  $10^{-16}$ ) y representa valores mucho menores, dentro de los límites del punto flotante. En la inversión  $\varepsilon = 3,84 \times 10^{-8}$ : la velocidad está a 41,5 km/h de  $c$  y ese número se exhibe con dos dígitos significativos.
- **Distancia que falta.**  $D - r$  perdería los últimos kilómetros de  $6,6 \times 10^{19}$  m (en esa magnitud, el espaciado entre doubles es de 8.192 m); el frenado usa (8), que llega a cero de forma continua, y el mapa de la ruta convierte a kilómetros a partir de ella.
- **Diferencias de funciones hiperbólicas.** (6) usa las identidades de producto a suma en lugar de  $\cosh \eta - \cosh \eta_1$ , que perdería dígitos al inicio de la fase 2.
- **Doppler y aberración.** (10) y (11) nunca forman  $1 - \beta \cos \theta$ ; el ángulo se propaga como  $\tan(\theta/2)$ , con las ramas sin  $\theta/(1 + \cos \theta)$  y  $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$ ; el límite  $\tan(\theta'/2) > 10^{15}$  se trata como  $\theta' = \pi$ . La composición con el dipolo solar calcula  $\gamma - |\gamma\beta|$  como  $e^{-\eta}$ .
- **Combustible.** Fracciones mediante  $\exp m1/\exp$  y reserva calculada directamente; en el formateo de la radio, porcentajes en enteros decimales (BigInt) para que 99,9...% y 0,0...1% sumen 100% sin redondear la reserva a cero.

- **Fondo cósmico.** Radiancia en tabla logarítmica; temperatura por  $|d - eje|^2$ , estable en el ápice; integración por píxel con conservación del flujo, criterio de subdivisión en unidades angulares; suma en 32 bits fuera del *buffer* de media precisión de las estrellas, que está limitado a 60.000 para que no se desborde.
- **Profundidad.** Codificación logarítmica  $\log_2(1 + d)/34$ , con  $d$  en años luz, compartida entre estrellas y nebulosa: un rango de muchos órdenes de magnitud en el mismo *buffer* — rango representable, no resolución; en float32 el término  $1 + d$  pierde incrementos por debajo de  $\sim 10^{-7}$  al.
- **Reloj.** Alineación con el servidor mediante HEAD (una estimación, Sección 3.1);  $T_0$  y los tiempos son enteros de milisegundos;  $\tau = t - T_0$  es exacto en doble precisión durante  $\sim 10^5$  años.

### 10.3 Verificación

El repositorio incluye 128 pruebas automatizadas en 19 archivos (Node.js), ejecutadas en cada modificación, y dos páginas de verificación en el navegador (806 verificaciones del mapa de la ruta y 2.804 de los textos de la radio). Entre las pruebas físicas: la irradiancia del CMB frente a sus dos límites analíticos; la emisividad  $H\alpha$  frente a la relación medida de emisión-Rayleigh; la parada con  $v = 0$  y quema total en  $\tau_{\text{fim}}$ ; la velocidad en los sobrevuelos (desplazamiento =  $\gamma\beta c \cdot \Delta\tau$ ); la estabilidad del CMB tras una hora simulada y la independencia del historial; la ausencia de un pico artificial en la popa; la imagen de la Tierra en la cámara trasera; y una réplica en CPU del shader de puntos sobre las 109.400 estrellas del HYG, que fija el límite de magnitud en reposo (agrupadas por la parte entera de la magnitud: toda estrella hasta mag 7 visible; 30–60% de las de mag 8; ninguna de mag 9; 50.000–62.000 visibles en el cielo entero), el color blanco de Sirio, el aumento de estrellas delante con 1 año de a bordo, el predominio de estrellas frías desplazadas a los 3 años y el anillo de  $1^\circ$  con 300–2.000 estrellas en la inversión. La limpieza de la versión 1.0 se cotejó mediante una comparación píxel a píxel de un estado congelado (0,03% de píxeles diferentes, solo dígitos que cambian con el reloj). Los números de esta sección se refieren a la versión 1.1.0 del sitio, del 19/10/2026: las pruebas se ejecutan con `node --test check-*.mjs` en la carpeta `hybrid/`, y las páginas de verificación se abren en el navegador (`check-route.html`, `check-radio.html`); las fuentes de los datos y de la malla, con los hashes de los archivos, están en la página "Fuentes y créditos". Estas pruebas verifican la consistencia interna con el modelo; no son una validación observacional — superarlas no calibra las fotografías ni demuestra que un ojo humano vería ese brillo.

### 10.4 Publicación y tiempo real

El sitio se publica como archivos estáticos; la publicación estampa la versión, un identificador de generación y el instante  $T_0 = 1792422000000$  ms (época Unix), sellado: toda publicación posterior repite el mismo  $T_0$ , y los atajos de tiempo usados en el desarrollo se ignoran en la copia publicada. El instante es único para todos los visitantes; el estado exhibido es la función de estado evaluada en el reloj real.

## 11. Limitaciones y problemas conocidos

Las simplificaciones se enumeran para el público en la página "Licencia poética"; aquí se organizan por tipo, con lo que se sabe de su magnitud.

### 11.1 Imposibilidades asumidas

- **Propulsión.** No existe un cohete de fotones perfecto. La razón de masas de  $5,2 \times 10^7$  para 100 t de masa seca total, y la potencia de  $1,68 \times 10^{22}$  W en la partida, están fuera de cualquier ingeniería conocida. En un modelo simplificado con una fracción constante  $1 - f$  de la energía de masa perdida emitida en fotones colimados, y el resto escapando isotrópicamente en el sistema de referencia instantáneo de la

nave, la razón de masas es  $e^{b_{\text{fim}}/(1-f)}$ : como ejemplo hipotético, una eficiencia del 50% eleva la razón de  $5,2 \times 10^7$  a  $2,7 \times 10^{15}$  — ese porcentaje no representa una eficiencia universal de los motores de antimateria. La masa de tanques, radiadores y reserva es cero.

- **Escudo y tripulación.** Flujo de  $5,9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$  ( $n = 0,1 \text{ cm}^{-3}$ ) sin efecto sobre la nave; dosis, erosión por granos, radiación secundaria e ionización no modeladas; inversión instantánea; 1 g ininterrumpido después del ascenso, en la aceleración y en el frenado (cero en la parada); sin soporte vital.
- **Lanzamiento.** Ascenso vertical sin atmósfera, arrastre, rotación (465 m/s) ni órbita de la Tierra (29,8 km/s), sin órbita de estacionamiento; partir de una órbita de 400 km cambiaría un 0,008% del combustible y 41 min de a bordo. La dirección del ascenso es la de la ruta, lo que exigiría M16 en el cenit de la base en el  $T_0$ ; al mediodía del 19/10/2026 estaba a  $\sim 30^\circ$  de altura en esa longitud, y la orientación visual fija de la Tierra oculta la diferencia.

## 11.2 Límites de los datos

- **Distancia.** 7.000 al al centro de M16 es el valor clásico; los paralajes de Gaia DR2 dan  $1.740 \pm 130 \text{ pc} \approx 5.700 \pm 400$  al para NGC 6611 [18]. La diferencia cambia poco el tiempo de a bordo ( $17,2 \rightarrow 16,8$  años, por el logaritmo en (7)), pero cambia en  $\sim 1.300$  años el tiempo en la Tierra y escala todas las dimensiones de la nebulosa (altura de los Pilares  $8,6 \rightarrow 7,0$  al).
- **Nebulosa.** Toda la profundidad es hipótesis: láminas, plano común de las estrellas, exponente del realce, conversión  $\tau_f \rightarrow \tau_v$ , albedo,  $g$ ,  $\kappa$ , una única medida de emisión; solo ocho de las  $\sim 500$  estrellas del cúmulo iluminan el gas; espectro de líneas de un solo punto, solo óptico; sin dispersión múltiple; la nebulosa se muestra como en las fotografías — luz emitida  $\sim 6.992$  años antes de 2026, a la distancia adoptada —, mientras que en la llegada, 6.987 años terrestres después de la partida, la nave recibe luz emitida  $\sim 7$  años antes de ese instante: entre las dos épocas observadas median  $\sim 14.000$  años de evolución no modelada. Según la tasa de fotoevaporación medida (McLeod et al. [15]:  $\sim 70 M_\odot/\text{Myr}$ , vida  $\sim 3 \text{ Myr}$ ), el cambio sería pequeño. La sugerencia de una supernova reciente a partir de datos de Spitzer [19] es una hipótesis de divulgación; las imágenes del Hubble de 1995 y 2014 [13] registran solo cambios pequeños en los Pilares.
- **Catálogos.** 299.858 estrellas frente a miles de millones reales; faltan las débiles y las distantes, en especial las que la aberración traería a la ventana cerca de M16; el suplemento Gaia no tiene velocidades (queda inmóvil) y fue seleccionado con un eje de ruta  $0,1^\circ$  anterior al actual; temperaturas por color o clase, espectros sin líneas.
- **Polvo.** Modelo suave de disco (12), sin las nubes reales de la dirección de Serpens/Aquila; Vía Láctea difusa y galaxias externas sintéticas.
- **Movimiento de M16.** Ninguna velocidad relativa Sol-cúmulo; la escala de lo que se ignora es de 0,024 al en 7.000 años por km/s.

## 11.3 Decisiones de escena

- **Encuentros.** Planetas colocados en el cruce del radio orbital, en lados alternos, a 1,5 radios; iluminación de dirección fija (fase no real); sin Doppler de color ni ganancia de radiancia en los planetas (hasta 3,7% en frecuencia y 15,5% en radiancia con  $\beta \leq 0,036$ ; en la Nube de Oort,  $\beta = 0,25$  y  $D \approx 1,3$  casi triplicarían el brillo); anillos de Saturno sintéticos, con bordes a hasta 0,55% de los reales; anillos de Urano con franjas de 400–1.500 km de ancho frente a 1–10 km reales; lunas de Júpiter fijas; Caronte  $\sim 20\%$  más cerca de Plutón que en la realidad; veinte rocas como cinturón; Nube de Oort con nueve grupos inventados en 24 h (frecuencia real  $\approx 0$ ); "pared" de la Burbuja Local a 300 al, artística.
- **Tierra.** Mapa Blue Marble de 2004 con nubes históricas; la Tierra exhibida no gira (meridiano y terminador del  $T_0$ ); sin meteorología, estaciones ni luces urbanas.

- **Cabina y percepción.** Una imagen única con capas de luz; sin sonido, vibración ni peso; cámara de exposición fija, sin adaptación del ojo ni calibración fotométrica del monitor; el reflejo del vidrio es una capa visual, no una simulación óptica.
- **Narrativa.** La nave, la base, la placa y la radio de a bordo (2.415 frases, personajes ficticios, sin lecturas ni averías inventadas) son ficción; la empresa es real.

#### 11.4 Inconsistencias internas conocidas

- La densidad del medio en el cálculo del escudo es  $0,1 \text{ cm}^{-3}$  en todo el viaje, mientras que la estimación del brillo dispersado del escape usa  $1 \text{ cm}^{-3}$  en la ruta y  $100 \text{ cm}^{-3}$  en la cavidad de M16; dentro de la heliosfera el valor es otro distinto. El calor en el escudo varía en un factor 10 según la elección.
- La luminosidad solar aparece como  $3,83 \times 10^{26} \text{ W}$  en las unidades del panel de energía y  $3,828 \times 10^{26} \text{ W}$  en los hitos (0,05%).
- Los textos del diario llaman al punto final "llegada a los Pilares", mientras que el mapa lo llama parada, a 6,9 al de la cara más cercana.

#### 11.5 Hipótesis y sensibilidad del modelo

- La temperatura de equilibrio del escudo usa radiación por una cara; por dos caras sería  $2^{-1/4}$  (16%) menor.
- El realce fotográfico invertido (exponente 2,4), el factor 1,725 de la malla, el techo  $\tau_v \leq 8$  y la rejilla de  $142 \times 234 \times 218$  son decisiones de diseño documentadas, no mediciones; cambiarlas cambia la apariencia de la nebulosa sin contradecir dato alguno.

### 12. Conclusión

La Borealis Horizon muestra que un viaje relativista puede presentarse al público con los números correctos, en tiempo real, durante 17 años, con un código que cabe en un navegador: cinemática en forma cerrada, luz transformada dirección por dirección, fondo cósmico calculado a partir de la ley de Planck y una nebulosa construida a partir de observaciones públicas, todo bajo exposición fija y decisiones visuales documentadas. El precio son las simplificaciones declaradas — un motor y un escudo que no existen, una distribución volumétrica de la nebulosa que las observaciones no determinan por sí solas, planetas colocados donde quedan bonitos — y este documento las hace explícitas, con la magnitud de cada una, para que el lector sepa exactamente qué está viendo.

### Referencias

- [1] Rindler, W. *Relativity: Special, General, and Cosmological*. 2.<sup>a</sup> ed., Oxford University Press, 2006.
- [2] Møller, C. *The Theory of Relativity*. 2.<sup>a</sup> ed., Clarendon Press, 1972.
- [3] Rindler, W. "Kruskal space and the uniformly accelerated frame". *American Journal of Physics* 34, 1174 (1966).
- [4] Penrose, R. "The apparent shape of a relativistically moving sphere". *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 55, 137 (1959); la forma del semiángulo de la aberración se deduce de la transformación de Lorentz de los cosenos directores.
- [5] Peebles, P. J. E.; Wilkinson, D. T. "Comment on the anisotropy of the primeval fireball". *Physical Review* 174, 2168 (1968) — radiancia  $\propto D^4$  e invariancia de  $I_\nu/\nu^3$ .
- [6] Wyman, C.; Sloan, P.-P.; Shirley, P. "Simple analytic approximations to the CIE XYZ color matching functions". *Journal of Computer Graphics Techniques* 2(2), 1 (2013). <https://jcgt.org/published/0002/02/01/>
- [7] Ballesteros, F. J. "New insights into black bodies". *EPL* 97, 34008 (2012). arXiv:1201.1809.

- [8] Nash, D. *HYG Database* v4.1 (CC BY-SA 4.0). <https://github.com/astronexus/HYG-Database>
- [9] Tribick, A. *celestia-gaia-stardb* v1.1.1.1 — Gaia EDR3 / Hipparcos / Tycho para Celestia (CC BY-NC 3.0 IGO); Gaia Collaboration, *A&A* 649, A1 (2021); Bailer-Jones et al, *AJ* 161, 147 (2021). <https://github.com/ajtribick/celestia-gaia-stardb>
- [10] Particle Data Group, "Cosmic microwave background", *Review of Particle Physics* (2025), ec. 29.2:  $T_0 = 2,7255$  K; dipolo de 369,82 km/s hacia  $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$ . Fixsen, D. J. "The temperature of the cosmic microwave background". *ApJ* 707, 916 (2009).
- [11] Planck Collaboration. "Planck 2018 results. I. Overview". *A&A* 641, A1 (2020).
- [12] ESO. "The Eagle Nebula" (eso0926a), WFI/La Silla, 2009, CC BY 4.0. <https://www.eso.org/public/images/eso0926a/>
- [13] NASA/ESA Hubble. "Pillars of Creation" (heic1501a) y comunicado heic1501, 2015, CC BY 4.0. <https://esahubble.org/news/heic1501/>
- [14] Sana, H. et al. "The massive star binary fraction in young open clusters — II. NGC 6611 (Eagle Nebula)". *MNRAS* 400, 1479 (2009).
- [15] McLeod, A. F. et al. "The Pillars of Creation revisited with MUSE: gas kinematics and high-mass stellar feedback traced by optical spectroscopy". *MNRAS* 450, 1057 (2015).
- [16] Semyonov, O. G. "Radiation hazard of relativistic interstellar flight". *Acta Astronautica* 64, 644 (2009). arXiv:physics/0610030.
- [17] Semyonov, O. G. "Radiation conditions in relativistic interstellar flight". *Acta Futura* 12 (2020). arXiv:2004.10079.
- [18] Kuhn, M. A.; Hillenbrand, L. A.; Sills, A.; Feigelson, E. D.; Getman, K. V. "Kinematics in young star clusters and associations with Gaia DR2". *ApJ* 870, 32 (2019).
- [19] Flagey, N. et al. "Tracing the energetics and evolution of dust with Spitzer: a chapter in the history of the Eagle Nebula". *A&A* 531, A51 (2011).
- [20] NASA Earth Observatory. *Blue Marble: Next Generation* (enero de 2004) y *Blue Marble Clouds*.
- [21] Solar System Scope. *Solar System Textures* (CC BY 4.0); NASA/JHUAPL/SwRI, mapa de Plutón (New Horizons).
- [22] Ashby, N. "Relativity in the Global Positioning System". *Living Reviews in Relativity* 6, 1 (2003).

## Apéndice A. Constantes y parámetros

| Símbolo              | Valor                                                                                                                                                                                  | Uso                                                           |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| c                    | 299.792.458 m/s                                                                                                                                                                        | exacto                                                        |
| $g_0$                | 9,80665 m/s <sup>2</sup>                                                                                                                                                               | aceleración propia de crucero                                 |
| año                  | 365,25 d = 31.557.600 s                                                                                                                                                                | año luz = $9,4607 \times 10^{15}$ m;<br>calendario de a bordo |
| UA                   | $1,495978707 \times 10^{11}$ m                                                                                                                                                         | velocidad propia, hitos                                       |
| $R_{\oplus}$         | 6.371 km                                                                                                                                                                               | $GM = g_0 R_{\oplus}^2$                                       |
| $T_0$ (CMB)          | 2,7255 K                                                                                                                                                                               | monopolo                                                      |
| dipolo solar         | 369,82 km/s; (l, b) = (264,021°, 48,253°)                                                                                                                                              | composición con el boost de la nave                           |
| $\sigma$             | $5,670374419 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$                                                                                                                           | irradiancia, escudo                                           |
| $m_p c^2$            | $1,50327759 \times 10^{-10}$ J (938,27 MeV)                                                                                                                                            | flujo en el escudo                                            |
| n                    | 0,1 cm <sup>-3</sup>                                                                                                                                                                   | densidad del medio (escudo)                                   |
| $m_{\text{fim}}$     | 100 t                                                                                                                                                                                  | masa seca                                                     |
| D, distancias        | 7.000 al (centro de M16); 6.992 al (plano de los Pilares); 6.985 al (parada)                                                                                                           | ruta                                                          |
| dirección de la ruta | l = 16,890922°, b = 0,753177°                                                                                                                                                          | tercio superior de los Pilares                                |
| polvo                | K = $5,1 \times 10^{-4}$ al <sup>-1</sup> ; H = 330 al; $z_{\odot}$ = 65 al; canales (-0,18; 0; 0,30)                                                                                  | extinción                                                     |
| exposición           | $E_{\text{oscuro}} = 5.400$ a 1.200 px/rad; $\sigma_{\text{PSF}} = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad})$                                                              | cielo                                                         |
| nebulosa             | escala 1,725; láminas 15 al ( $\sigma$ 3), 8,5 al ( $\sigma$ 2), estrellas 3,2 al; $\tau_v = \tau_f(1 + 2,6\tau_f)$ ; albedo 0,5; g = 0,6; $\kappa = 6 \text{ al}^{-1}$ ; 224 muestras | transporte                                                    |

Profundidad óptica de (12) a lo largo de un segmento de longitud d entre alturas  $z_0$  y  $z_1$  (medidas desde el plano):  $\tau = K d e^{-|z|/H}$  si  $|z_1 - z_0| < 10^{-3} d$ , y, en caso contrario,  $\tau = (K d / \Delta z) [\text{sgn}(z_1) H (1 - e^{-|z_1|/H}) - \text{sgn}(z_0) H (1 - e^{-|z_0|/H})]$ .

## Apéndice B. Hitos del viaje

| Hito                                              | Tiempo de a bordo           | Estado                                                        |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Escape de la gravedad terrestre ( $v^2 = 2GM/r$ ) | 44 min                      | ascenso a 0,1–1 g neta                                        |
| Luna (radio orbital)                              | 2,98 h                      | 307 mil km/h; 41 s para cruzar el diámetro                    |
| Fin del ascenso (inicio de la forma cerrada)      | 24 h                        | $34,9 \times 10^6$ km; 827 km/s                               |
| Marte · Ceres · Júpiter                           | 2,19 · 3,27 · 4,59 d        | sobrevuelos escenográficos a 1,5 radios                       |
| Saturno · Urano · Neptuno · Plutón                | 6,25 · 8,87 · 11,1 · 12,7 d | Plutón a $38,7 \times 10^6$ km/h                              |
| Nube de Oort (2.000 UA)                           | 90,2 d                      | $\beta = 0,25$ ; salida del modelo (100.000 UA) en el día 574 |
| Burbuja Local (300 al)                            | 6,23 años                   | $\gamma \approx 310$                                          |
| CMB a 1.000 K en la proa                          | 5,72 años                   | Tabla 2                                                       |
| Inversión                                         | 8,606 años                  | $\gamma = 3.606$ ; 3.493 años en la Tierra; 3.492,5 al        |
| Parada                                            | 17,211 años                 | 6.985 al; 6.987 años en la Tierra; $v = 0$ ; combustible cero |

Borealis Dynamics · Borealis Horizon, versión 1.1.0 · Las fuentes y licencias de cada recurso están en la página "Fuentes y créditos" del sitio; las simplificaciones, en "Licencia poética"; los cambios de cada versión, en "Versiones". El sitio es no comercial, educativo y gratuito.