

Borealis Horizon: un viaggio relativistico in tempo reale fino ai Pilastri della Creazione — modello, implementazione e limiti

Borealis Dynamics

Esperimento pubblico su <https://ngc6611.pages.dev> · versione 1.1.0 del sito · decollo il 19 ottobre 2026, 12:00 (UTC-3) · documento del 19/10/2026

RIASSUNTO

La Borealis Horizon è una simulazione pubblica, eseguita nel browser, di un viaggio interstellare con accelerazione propria costante di 1 g dalla Terra fino a un punto a 7 anni luce dai Pilastri della Creazione (M16), percorrendo 6.985 anni luce nel sistema di riferimento della Terra. La simulazione scorre in tempo reale a partire da un istante di partenza fissato al momento della pubblicazione: l'osservatore vede, a ogni secondo di bordo, lo stato cinematico previsto dal modello — ottenuto per integrazione numerica nell'ascesa e mediante espressioni in forma chiusa nelle fasi relativistiche di accelerazione e frenata — e il cielo che registrerebbe una telecamera a esposizione fissa. Questo articolo documenta il modello fisico (moto iperbolico in forma chiusa con una fase iniziale newtoniana integrata con Runge-Kutta; dilatazione del tempo; ritardo dei segnali e orizzonte di accelerazione; aberrazione e spostamento Doppler di colore e luminosità; estinzione interstellare; fondo cosmico a microonde trasformato direzione per direzione; ricostruzione tridimensionale della Nebulosa Aquila a partire da fotografie pubbliche; razzo a fotoni ideale), le scelte di implementazione (formulazioni numericamente stabili per γ fino a $\sim 10^4$, tabelle precalcolate, integrazione che conserva il flusso, verifica mediante test di regressione) e i limiti noti. Con $\gamma = 3.606$ all'inversione, 17,21 anni di bordo e 6.987 anni sulla Terra, il viaggio è presentato come un esperimento di visualizzazione: fedele dove la fisica è calcolabile e dichiaratamente semplificato dove l'ingegneria o i dati non esistono.

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.

Parole chiave: relatività ristretta; moto iperbolico; aberrazione; effetto Doppler; fondo cosmico a microonde; Nebulosa Aquila; visualizzazione scientifica; WebGL. **Keywords:** special relativity; hyperbolic motion; aberration; Doppler effect; cosmic microwave background; Eagle Nebula; scientific visualization; WebGL.

1. Introduzione e progetto dell'esperimento

I viaggi con accelerazione propria costante sono l'esempio classico di come la relatività ristretta trasformi distanze galattiche in durate umane: la rapidità cresce linearmente con il tempo proprio e la distanza percorsa cresce esponenzialmente con essa [1, 2]. Ciò che raramente si vede è l'*aspetto* di questo viaggio — come il cielo si comprime in avanti, come cambiano i colori, come il fondo cosmico a microonde (CMB) diventa un fuoco visibile, come l'immagine della Terra si congela dietro la nave — presentato senza scorciatoie, con i numeri corretti, lungo la durata reale del viaggio.

La Borealis Horizon è questo esperimento. La nave parte da una base costiera fittizia, sale con una spinta di 1,1 g, passa a 1 g di accelerazione propria costante, inverte la spinta a metà del percorso e si ferma, in quiete rispetto alla Terra, 7 anni luce prima del piano dei Pilastri della Creazione, dopo 6.985 anni luce. La simulazione gira in un normale browser (HTML, JavaScript e WebGL2, senza librerie esterne), e l'istante della partenza, $T_0 = 19/10/2026\ 12:00:00\ \text{UTC}-3$, è stato fissato al momento della pubblicazione: tutti i visitatori vedono la stessa nave, nello stesso punto, in tempo reale. Non c'è accelerazione del tempo, pausa né ritorno; il viaggio dura 17,21 anni di bordo di durata reale del sito.

Il progetto obbedisce a tre principi. (i) *Fedeltà dove c'è calcolo*: cinematica, orologi, luce e fondo cosmico sono calcolati a partire dalle leggi fisiche, senza effetti scenici. (ii) *Esposizione fissa*: il guadagno e la funzione di compressione tonale del finestrino sono fissati in anticipo, senza regolazione automatica dell'esposizione in base alla scena. (iii) *Semplificazione dichiarata*: ciò che l'ingegneria non sa fare (il motore, lo scudo) e ciò che i dati non contengono (la terza dimensione della nebulosa) è assunto esplicitamente ed elencato per il pubblico nella pagina "Licenza poetica" del sito. Questo articolo è la controparte tecnica di quell'elenco: descrive il modello, le formule, l'implementazione e i problemi noti.

La Sezione 2 presenta il modello di moto; la Sezione 3, il tempo e i segnali; la Sezione 4, la luce (aberrazione, Doppler, estinzione, cataloghi, esposizione, Terra); la Sezione 5, il fondo cosmico; la Sezione 6, la ricostruzione della Nebulosa Aquila; la Sezione 7, la propulsione, l'energia e il flusso sullo scudo; la Sezione 8, gli incontri scenografici; la Sezione 9, gli strumenti, il diario e la radio di bordo; la Sezione 10, l'implementazione e la robustezza numerica; la Sezione 11, le limitazioni e i problemi noti. Le appendici raccolgono costanti, parametri e traguardi.

2. Modello di moto

2.1 Fase di ascesa ($\tau < 24\ \text{h}$)

La traiettoria è una funzione pura del tempo di bordo τ (secondi dalla partenza), definita in due fasi. Nella prima, di durata fissa pari a un giorno di bordo, la nave sale radialmente dalla superficie della Terra sotto la gravità terrestre e una spinta per unità di massa

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

con $GM = g_0 R_\oplus^2$ ($g_0 = 9,80665\ \text{m/s}^2$, $R_\oplus = 6.371\ \text{km}$), in modo che la spinta valga 1,1 g sulla piattaforma e passi a g_0 quando $1,1\ GM/r^2$ scende sotto g_0 , a 311 km di quota ($r = R_\oplus\sqrt{1,1}$). L'accelerazione risultante è $a(r) - GM/r^2$: 0,1 g netto all'inizio, che cresce fino praticamente a 1 g man mano che la gravità terrestre svanisce. In questa fase non ci sono atmosfera, resistenza aerodinamica, rotazione della Terra, Sole né Luna (Sezione 11). Il sistema

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

è integrato con il metodo di Runge–Kutta del quarto ordine a passo variabile prescritto $h = 0,02 + 5 \times 10^{-4} \tau$ (da 20 ms a terra a 43 s alla fine del giorno), memorizzando le tabelle di τ , r , v e dell'accelerazione. Poiché $v \ll c$ durante tutto il giorno (827 km/s alla fine), la fase è trattata come newtoniana; la correzione relativistica entra in due integrali accumulati insieme allo stato: la *combustione* b (rapidità accumulata dalla spinta, Sezione 7),

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

integrata con la regola di Simpson a ogni passo, e il tempo della Terra $t_\oplus$, con la dilatazione al primo ordine in v^2/c^2 ,

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

valutata con la media di v^2 agli estremi del passo. Alla fine del giorno la nave si trova a 34,9 milioni di chilometri dal centro della Terra, a 827 km/s, con $t_\oplus - \tau = 0,107$ s. Tra i nodi della tabella, lo stato è interpolato con polinomi di Hermite cubici usando le derivate note (v per r , a per v), il che preserva la continuità di r , v e dell'accelerazione riportata.

2.2 Fase relativistica: moto iperbolico in forma chiusa

A partire da $\tau_1 = 86.400$ s, l'accelerazione propria è costante, $a = g_0$, e la traiettoria è il moto iperbolico di Rindler [1, 3]. Con la rapidità η definita da $\beta = \tanh \eta$ e $\gamma = \cosh \eta$, l'accelerazione propria costante dà

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

con $\eta_1 = \operatorname{artanh}(v_1/c) = 2,76 \times 10^{-3}$ la rapidità alla fine dell'ascesa. La posizione radiale e il tempo della Terra seguono, per $\tau_1 \leq \tau < \tau_F$,

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

che sono le identità $\cosh \eta - \cosh \eta_1 = 2 \sinh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ e $\sinh \eta - \sinh \eta_1 = 2 \cosh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ scritte senza la sottrazione di due numeri quasi uguali (Sezione 10). L'inversione avviene alla rapidità η_F tale che la frenata simmetrica, da η_F a zero, copra esattamente la distanza restante fino alla destinazione $D = 6.985$ a.l.:

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

ottenuta uguagliando $r(\eta_F) + (c^2/a)(\cosh \eta_F - 1) = D$. Nella frenata ($\tau_F \leq \tau < \tau_{\text{fim}}$) la rapidità decresce linearmente, $\eta = (\tau_{\text{fim}} - \tau) a/c$, e la distanza che manca è

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

La Tabella 1 riassume i valori. La scala $c/a = 0,9687$ anni è la costante naturale del viaggio: ogni 0,9687 anni di bordo aggiungono un'unità alla rapidità; ogni "9" in più nella frazione della velocità della luce costa lo stesso tratto di nastro, come mostra il nastro della rapidità del pannello della velocità.

Tabella 1. Valori caratteristici della traiettoria ($a = g_0$, $D = 6.985$ anni luce).

Grandezza	Valore	Osservazione
Fine dell'ascesa, τ_1	86.400 s	$r_1 = 3,49 \times 10^7$ km, $v_1 = 827$ km/s, $\eta_1 = 2,76 \times 10^{-3}$
Rapidità all'inversione, η_F	8,8836	$\gamma_F = 3.606,3$; $1 - \beta_F = 3,84 \times 10^{-8}$ (mancano 41,5 km/h a c)
Inversione, τ_F	8,6057 anni	$t_{\oplus} = 3.493,47$ anni; $r_F = 3.492,5$ a.l.
Arrivo, τ_{fim}	17,2114 anni	6.286,5 giorni di bordo; $t_{\oplus} = 6.986,94$ anni
Velocità propria massima, $\gamma\beta c$	7,23 UA/s	distanza sulla mappa della Galassia per secondo di bordo
Percorso contratto all'inversione, D/γ_F	1,94 a.l.	l'intera rotta, misurata a bordo
Combustione totale, b_{fim}	17,7672	rapporto di massa $e^b = 5,20 \times 10^7$ (Sezione 7)

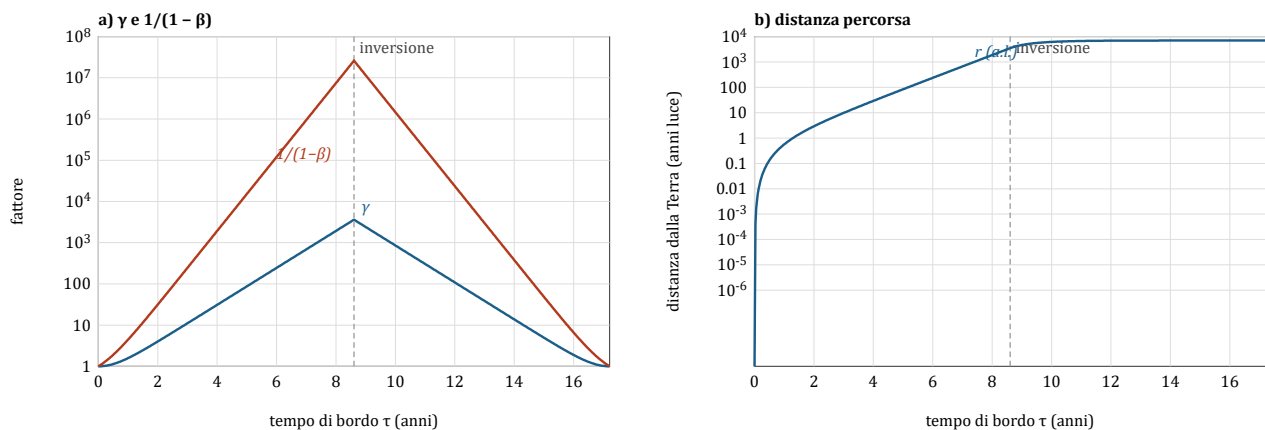


Figura 1. Cinematica del viaggio in funzione del tempo di bordo, secondo le equazioni (5)–(8): (a) il fattore di Lorentz $\gamma = \cosh \eta$ e $1/(1 - \beta) = (e^{2\eta} + 1)/2$ crescono esponenzialmente fino all'inversione ($\gamma = 3.606$; $1 - \beta = 3,8 \times 10^{-8}$) e decrescono simmetricamente durante la frenata; (b) la distanza dalla Terra in anni luce, in scala logaritmica — la nave supera 1 anno luce a 1,29 anni di bordo e metà del percorso (3.492,5 a.l.) all'inversione.

2.3 Stato istantaneo e traguardi

Per qualsiasi τ la funzione di stato restituisce fase, τ , $t_{\oplus}$, r , v , η , β , γ , $\varepsilon = 1 - \beta$, accelerazione riportata e combustione. I traguardi definiti da una distanza o da una grandezza fisica (fuga dalla gravità terrestre, orbite planetarie, 1 giorno luce, eliopausa, Nube di Oort, Bolla Locale, soglie di temperatura del CMB, distanze di stelle di riferimento) sono risolti per bisezione sulla funzione di stato, con al massimo 200 iterazioni e arresto quando il punto medio coincide con un estremo in doppia precisione; i traguardi di durata fissa e di calendario sono costruiti direttamente. Un traguardo come "Distanza di Proxima Centauri" significa raggiungere, a partire dalla Terra, la distanza di quella stella (4,25 a.l.) — non passarle accanto. Lo stesso stato alimenta tutti i pannelli, il diario di bordo, la radio e il cielo: non esiste una seconda fonte di verità.

3. Tempo e segnali

3.1 Orologi

L'orologio di bordo è l'orologio reale del visitatore, allineato a quello del server tramite l'intestazione Date di una richiesta HEAD — una stima dell'allineamento, non una garanzia: l'intestazione ha una risoluzione di 1 s, la rete può essere asimmetrica e, se la richiesta fallisce, vale l'orologio locale — e $\tau = t_{ora} - T_0$. Il pannello "Terra in anticipo" mostra $t_{\oplus} - \tau$ con unità dinamica. All'inizio la differenza cresce come

$a^2\tau^3/(6c^2)$, per la (4): 1,8 attosecondi nel primo secondo, 1 picosecondo solo a 82 s — al di sotto della risoluzione dell'integrazione in doppia precisione nei primi secondi, il che spiega il limite inferiore in picosecondi del pannello; all'arrivo sono 6.970 anni di vantaggio. La velocità propria, $\gamma\beta c$, è mostrata nel pannello della velocità: all'inversione la nave avanza di 7,23 UA della mappa della Galassia per secondo di bordo. Il pannello di navigazione mostra la distanza mancante misurata a bordo (la distanza nel sistema di riferimento della Terra divisa per γ) e di quanto la contrazione ha già accorciato il cammino; divisa per γ_F , l'intera rotta misurerebbe 1,94 anni luce.

3.2 Sistemi di riferimento degli orologi

Negli strumenti compaiono tre tempi, ed è bene non confonderli. τ è il tempo proprio della nave — l'orologio di bordo. $t_{\oplus}$ è il tempo coordinato del sistema di riferimento inerziale in cui la Terra è in quiete, il "tempo terrestre" del modello; $t_{\oplus} - \tau$ è il vantaggio accumulato da questo orologio su quello di bordo, ma non è qualcosa che la telecamera posteriore possa mostrare: l'immagine che arriva è stata emessa a $t_{\oplus} - x/c$, molto prima (Sezione 3.3), e la simultaneità del sistema di riferimento istantaneamente comovente della nave è ancora un'altra costruzione, non usata nei pannelli. Allo stesso modo, $\gamma\beta c$ è distanza nel sistema di riferimento della Terra per secondo proprio della nave; localmente, nulla supera c . La relatività generale resta fuori dal modello: la gravità terrestre entra come forza newtoniana nell'ascesa, ma non c'è correzione gravitazionale degli orologi. La scala di ciò che si omette non è trascurabile rispetto alla precisione mostrata: il potenziale della superficie terrestre ($\Delta\Phi/c^2 \approx 7 \times 10^{-10}$) accumula ~ 150 s in 6.987 anni, e quello del Sole a 1 UA ($\approx 10^{-8}$), ~ 36 min — il "tempo terrestre" al secondo dipende dal sistema di riferimento e dal potenziale scelti [22].

3.3 Ritardo dei segnali e orizzonte di accelerazione

Il collegamento con la Terra è trattato con la Terra ferma nel punto di partenza e luce in linea retta (l'orbita terrestre, di 8 minuti luce, è trascurata rispetto a 6.985 anni luce). Con $x = r - R_{\oplus}$, l'immagine della Terra che arriva alla nave nello stato $(t_{\oplus}, x)$ è stata emessa a $t_{\oplus} - x/c$, e un segnale emesso dalla nave arriva alla Terra a $t_{\oplus} + x/c$. Per chi accelera a g partendo dalla quiete esiste un orizzonte: i segnali emessi dall'origine dopo $t_{\oplus} = c/a = 0,9687$ anni non raggiungono mai la nave finché essa accelera [3]. La simulazione non impone questo fatto; esso emerge dalla (6): all'inversione, la luce che arriva dalla Terra è stata emessa appena 0,9686 anni dopo la partenza e ha 3.492,5 anni di età; all'arrivo, è stata emessa 1,937 anni dopo la partenza.

L'immagine della Terra, oltre che vecchia, scorre al rallentatore ed è arrossata dal fattore Doppler posteriore

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

pari a $1/7.213$ all'inversione: un secondo di bordo mostra $1/7.213$ di secondo della Terra, e la luce arriva 7.213 volte più rossa. Il Sole a poppa è un corpo nero di 5.772 K visto a $T' = 5.772 e^{-\eta} = 0,80$ K all'inversione — più freddo del fondo cosmico — e una stazione FM a 100 MHz arriverebbe a 13,9 kHz. La telecamera posteriore mostra la data di emissione, l'età della luce e il fattore di rallentamento, calcolati con queste espressioni.

3.4 Calendario

I contatori di durata usano anni di 365,25 giorni (31.557.600 s) e mesi di un dodicesimo di anno; le date si ottengono sommando τ o $t_{\oplus}$ all'istante della partenza — fissato in UTC (19/10/2026 15:00:00 UTC,

presentato come 12:00 UTC-3) — e sono formattate nel fuso orario locale del visitatore; il calendario del diario di bordo usa il fuso orario di Brasília. Non esiste alcuna comunicazione reale: il pannello calcola il ritardo che un segnale avrebbe; la radio di bordo è finzione scritta per il tragitto (Sezione 11).

4. Luce

4.1 Aberrazione

Ogni sorgente in quiete nel sistema di riferimento della Galassia è vista dalla nave in una direzione aberrata. Con θ l'angolo tra la sorgente e la direzione del moto nel sistema di riferimento della Galassia e θ' l'angolo osservato, la relazione esatta è

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

la "formula dell'angolo dimezzato" [4]. È preferita alla forma usuale $\cos \theta' = (\cos \theta + \beta)/(1 + \beta \cos \theta)$ perché rimane stabile quando $\beta \rightarrow 1$: $\tan(\theta/2)$ è calcolata come $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$ per l'emisfero anteriore e $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$ per quello posteriore, senza cancellazione, e il fattore $e^{-\eta}$ comprime l'emisfero anteriore ($\theta < 90^\circ$) in un cono di raggio angolare $2 \cdot \text{atan}(e^{-\eta}) \approx 2e^{-\eta}$ attorno alla prua; la direzione esattamente posteriore resta dietro. All'inversione l'emisfero anteriore sta in un cerchio di $0,016^\circ$ di raggio — ciò che il pannello di aberrazione chiama "metà del cielo in un cerchio di θ' ". La stessa formula, invertita, è usata per la nebulosa, la Via Lattea diffusa e la Terra: si integra il raggio nel sistema di riferimento di quiete e si trasforma la radianza alla fine.

4.2 Doppler: colore e luminosità

Il fattore Doppler di una sorgente vista nella direzione θ' è $D = 1/[\gamma(1 - \beta \cos \theta')]$. Per $\gamma \sim 10^3$ l'espressione $1 - \beta \cos \theta'$ perde cifre vicino alla prua — in modo misurabile in doppia precisione e grave nel float32 dello shader; il cui epsilon di macchina (6×10^{-8}) supera $1 - \beta$ all'inversione; l'implementazione usa la forma equivalente

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

in cui ε è ottenuto direttamente dalla rapidità, senza sottrarre β da 1 (Sezione 10). Una stella trattata come corpo nero di temperatura T appare come corpo nero di temperatura $T' = D \cdot T$; una riga di emissione di lunghezza d'onda λ appare a $\lambda' = \lambda/D$; il flusso di una sorgente puntiforme scala con D^2 e la radianza di una sorgente estesa con D^4 [5]. Per le stelle del catalogo HYG, che hanno velocità propria, il Doppler della stella rispetto al sistema di riferimento della Galassia è incluso nello stesso logaritmo. È da queste tre regole, applicate a ogni stella, che emerge l'arco stellare: davanti, le stelle fredde (3.000–4.000 K) spostate di $D \sim 2$ –3 diventano bianche e azzurre, quelle calde spariscono nell'ultravioletto, e il cielo posteriore si spegne e arrossa.

4.3 Spettri, colori e cataloghi

Gli spettri stellari sono corpi neri. La conversione da temperatura a colore usa le funzioni di corrispondenza CIE 1931 nell'approssimazione analitica di Wyman, Sloan e Shirley [6], integrate numericamente con la legge di Planck tra 360 e 830 nm, e la matrice XYZ→sRGB lineare; il risultato è la frazione della potenza bolometrica che cade in ciascun canale, tabulata a 1.024 temperature da $\log_{10} T = 0,5$ a 9,5 e campionata nello shader con interpolazione (senza gradini di colore). La radianza di una stella di luminosità visuale L_V a distanza d è L_V/d^2 in unità di $L_\odot/(4\pi \text{ a.l.}^2)$, con la temperatura dell'HYG stimata

dall'indice di colore B-V (Ballesteros 2012 [7]; B-V = 0,65 quando manca) e quella dell'addendum Gaia per classe spettrale.

Il catalogo ha 299.858 stelle: le 109.400 dell'HYG v4.1 [8], con posizioni, velocità ed epoca J2000, e 190.458 selezionate dalla distribuzione Gaia EDR3/Hipparcos/Tycho preparata per Celestia [9] ($V < 9$ lungo la rotta, $V < 9$ sulla Terra o $V < 13$ entro 15° dalla destinazione), deduplicate tramite HIP/HD. Le posizioni sono tridimensionali, cosicché la parallasse lungo la rotta è geometrica, non messa in scena. Per l'HYG, la posizione mostrata è quella ritardata: si risolve, per iterazione di punto fisso, l'istante di emissione t_e tale che la luce emessa in $p + v \cdot (t_e - \text{epoca})$ arrivi all'osservatore nell'anno corrente, ancorando la soluzione alla posizione osservata all'epoca del catalogo. Non ci sono scintillazione, luce zodiacale né lenti gravitazionali.

4.4 Estinzione interstellare

La polvere è un disco assisimmetrico esplicito, con profondità ottica integrata tra osservatore e sorgente,

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

con il Sole a 65 a.l. dal piano; K equivale a 0,55 magnitudini per mille anni luce nel piano. L'integrale ha forma chiusa lungo un segmento rettilineo (appendice A). L'estinzione è applicata in modo *differenziale*: la magnitudine di catalogo include già l'estinzione fino alla Terra, quindi si sottrae la profondità ottica Terra-stella e si somma quella nave-stella, affinché una stella conservi la luminosità misurata finché la nave è vicina alla Terra. La dipendenza spettrale usa i fattori $\exp(-\{-0,18; 0; 0,30\} \cdot \tau)$ nei canali R, G e B. Il bagliore diffuso della Via Lattea è un modello di disco con densità $0,055 \cdot e^{-R/8500} \cdot e^{-|z|/700}$ (anni luce), spettro di 5.000 K e centro galattico a 26.670 a.l., integrato in 28 passi logaritmici fino a 72.000 a.l., con la stessa polvere; le Nubi di Magellano, M31 e M33 sono nuvole di particelle con la forma approssimata. Le interrogazioni alla mappa tridimensionale Bayestar non hanno risposto durante la preparazione, per cui nessuna nube reale di polvere è rappresentata (Sezione 11).

4.5 Esposizione fissa, PSF e conversione per lo schermo

Il renderer è HDR: il flusso di ogni stella è accumulato in un *buffer* a mezza precisione, in unità fisiche, con un guadagno fisso E scelto una volta per tutte ($E_{\text{buio}} = 5.400$ nella calibrazione di riferimento di 1.200 px/rad, scalato con $(\text{px/rad})^2$ affinché la luminosità sia indipendente dalla risoluzione). Una stella non risolta è disegnata come gaussiana compatta, $\sigma = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{px/rad})$, senza disco luminoso artificiale; un disco fisico appare solo quando il raggio angolare aberrato supera 1,2 px. La conversione per lo schermo è una compressione SDR fissa, non un occhio simulato né un'esposizione automatica:

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

in cui c è il colore lineare, L la sua luminanza e $s(L)$ una transizione morbida tra 1,5 e 12 che passa dal preservare la tinta al saturare canale per canale. Con questa calibrazione, in quiete ogni stella fino a magnitudine 7 appare e il limite di rendering si colloca nella fascia di magnitudine 8 — il criterio è un pixel al di sopra di una soglia fissa di luminosità sullo schermo, verificato da una replica su CPU dello shader sul catalogo (Sezione 10). Prendendo la magnitudine 8,0 come riferimento approssimativo e 6,5 come riferimento di osservazione a occhio nudo sotto un cielo buio, la differenza corrisponde a sorgenti con circa quattro volte meno flusso ($10^{0,4 \cdot 1,5} \approx 4$). Questo confronto caratterizza l'esposizione scelta; non costituisce una calibrazione della visione umana. I conteggi — circa 56.000 stelle renderizzate nell'intero

cielo, contro le ~9.000 visibili a occhio nudo — si riferiscono all'intero cielo e non misurano la sensibilità. La telecamera posteriore usa lo stesso guadagno.

4.6 Terra, atmosfera e base di lancio

La Terra è disegnata come sfera texturizzata con il composito Blue Marble: Next Generation di gennaio 2004 (2.048×1.024) [20] e la copertura nuvolosa Blue Marble Clouds, quest'ultima con dettaglio procedurale continuo in due strati sferici (1,5–3,8 km e 8,5–9,3 km di quota) affinché l'avvicinamento della telecamera non riveli i pixel. La superficie riceve la luce solare con il terminatore dell'istante della partenza e un alone atmosferico a diffusione singola; il cielo diurno visto dalla base si oscura tra 50 e 100 km di quota, per scelta visiva, mantenendo il lembo illuminato. La base è scenografia: latitudine uguale alla declinazione di M16 ($-13,88^\circ$, imposta dall'asse della rotta), longitudine visiva fissata a $-39,02^\circ$, telecamera a 35 m, torre di 112 m, litorale e fiume procedurali; i dettagli della base spariscono a 12 km e l'insieme a 90 km. L'orientamento della Terra mostrato non ruota (Sezione 11). Quando la Terra si riduce a meno di 1,2 px di raggio apparente diventa un punto, un corpo nero di 5.772 K con luminosità $1,36 \times 10^{-10} L_\odot$ e una tinta azzurrognola, e la Terra della scena occulta la stella che si trovi dietro il disco.

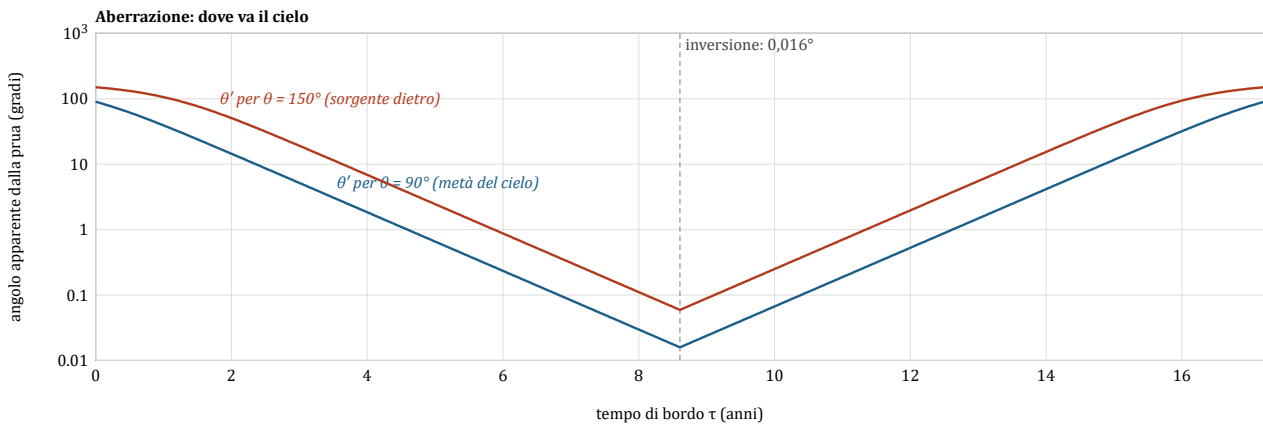


Figura 2. Angolo apparente, misurato dalla prua, di una sorgente che nel sistema di riferimento della Galassia si trova a 90° (confine della metà del cielo) e di una sorgente a 150° , quasi dietro la nave, secondo l'equazione (10): $\tan(\theta'/2) = e^{-\eta} \tan(\theta/2)$. Con 1 anno di bordo la metà del cielo sta già entro 39° ; con 3 anni, entro 7° ; all'inversione, entro $0,016^\circ$ — e la sorgente posteriore appare a $0,06^\circ$ dalla prua.

5. Fondo cosmico a microonde

Il CMB è un corpo nero a $T_0 = 2,7255$ K [10] nel sistema di riferimento in cui è isotropo. Per un osservatore in moto, ogni direzione continua a presentare uno spettro di corpo nero, con temperatura

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

con θ misurato a partire dalla direzione del moto [11]. La nave parte dal Sistema Solare, che si muove già a 369,82 km/s in direzione di $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$ rispetto al CMB [10]; il boost della nave è composto con questo dipolo: l'asse e la rapidità efficace del sistema di riferimento del CMB visto dalla nave si ottengono componendo le due velocità, avendo cura di calcolare $\gamma - |\gamma\beta|$ come $e^{-\eta}$ per evitare la cancellazione. La temperatura in una direzione d è allora $T_0/(e^{-\eta_{\text{eff}}} + \frac{1}{2}|\gamma\beta|_{\text{eff}}|d - \text{asse}|^2)$, dove $|d - \text{asse}|^2 = 2(1 - \cos \theta)$ è stabile all'apice. Alla prua, all'inversione, $T = 19.652$ K.

La radianza di ogni direzione è la legge di Planck integrata nel visibile con le funzioni CIE, tabulata a 2.048 temperature da 300 a 50.000 K in scala logaritmica. La macchia ottica è integrata sull'area di ogni pixel con

quadratura di Gauss a 4 punti e suddivisione adattiva (fino a sei livelli) del nucleo, la cui larghezza angolare $\sim 2e^{-\eta}$ rad è confrontata con il pixel indipendentemente dalla risoluzione; così un apice più piccolo di un pixel conserva la propria energia quando attraversa il confine tra pixel o cambia risoluzione. Sotto i 300 K di picco la coda visibile è inferiore a $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ e la macchia non viene calcolata. Il risultato è sommato in virgola mobile a 32 bit prima della compressione (13) e *non* è attenuato dalla polvere dei Pilastri, che è trasparente alle microonde nel sistema di riferimento della polvere.

L'irradianza su una lastra rivolta verso la prua, $\int \sigma T(\theta)^4 / \pi \cdot \cos \theta \, d\Omega$ sull'emisfero frontale, è tabulata in η con passi logaritmici in θ (il cono caldo ha larghezza $\sim 1/\gamma$): vale $\sigma T_0^4 = 3,1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ in quiete e tende a $(16/3)\gamma^2 \sigma T_0^4$, la componente T^{0x} della radiazione trasformata; all'inversione vale 217 W/m^2 , e i due limiti sono verificati nei test. La Tabella 2 riporta i traguardi di temperatura; la stessa irradianza, convertita tramite la frazione visibile del corpo nero, illumina la cabina (5,4% della luce solare visibile all'inversione).

Tabella 2. Temperatura del fondo cosmico alla prua lungo il viaggio.

Temperatura alla prua	Primo superamento (anni di bordo)	Tempo totale al di sopra del valore (anni)
300 K (inizio del calcolo ottico)	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 (picco, inversione)	8,61	—

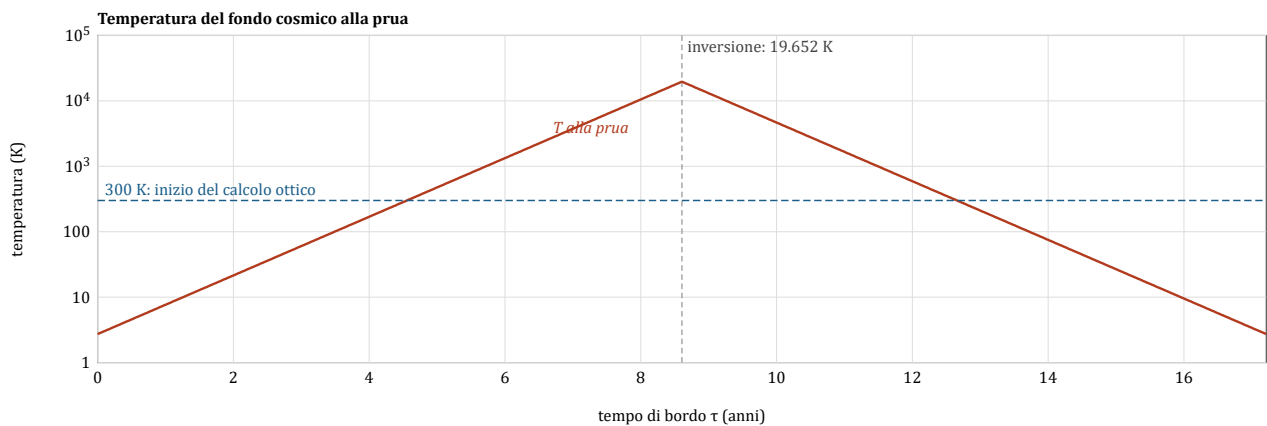


Figura 3. Temperatura di corpo nero del fondo cosmico nella direzione della prua, $T = T_0 e^{\eta}$ (corretta per il dipolo solare), secondo l'equazione (14): sale di un fattore e ogni 0,97 anni di bordo, supera i 300 K a 4,55 anni — quando la macchia ottica comincia a essere calcolata — e raggiunge 19.652 K all'inversione, per poi scendere simmetricamente durante la frenata.

6. Nebulosa Aquila: dati e ricostruzione

6.1 Dati

La geometria nel piano del cielo proviene da due fotografie pubbliche [12, 13]: ESO0926a (campo largo di 32', filtri B, V e R, CC BY 4.0) fornisce la struttura del campo largo; Hubble heic1501a (i Pilastri, CC BY 4.0), registrata per correlazione sulla prima (rotazione di 35°), entra nelle strutture più piccole di 0,08 a.l. Le direzioni delle stelle di NGC 6611 provengono da SIMBAD e sono state verificate, in secondi d'arco, rispetto al WCS dell'immagine ESO; temperature (32.000–41.500 K) e luminosità di otto sistemi provengono dalla

Tabella 5 di Sana et al. [14], con le binarie non risolte trattate come una sola sorgente. I rapporti di quindici righe ottiche relative a $H\beta$ ($H\alpha/H\beta = 4,343$) provengono dallo spettro di esempio di McLeod et al. [15], ottenuto con MUSE, e l'emissività $H\alpha$ usa il coefficiente di ricombinazione $3,56 \times 10^{-25} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}$, verificato tramite la relazione tra misura di emissione e brillantezza in Rayleigh. La profondità proviene da una mesh di riferimento per la stampa 3D (NASA/STScI), scalata di un fattore 1,725 per coincidere con la silhouette registrata: altezza dei Pilastri 8,625 a.l., riquadro di $6,39 \times 10,53 \times 9,81$ a.l., griglia di $142 \times 234 \times 218$ celle. Tutte le dimensioni trasversali sono angoli misurati moltiplicati per la distanza adottata, 7.000 a.l. dal centro di M16 e 6.992 a.l. dal piano dei Pilastri; la profondità è assunta (Sezione 6.2).

6.2 Modello di trasporto

L'enfatizzazione divulgativa delle fotografie è annullata con una legge di potenza di esponente 2,4 (ipotesi) e l'immagine risultante è scomposta in un involuppo di emissione (massimo morbido a 0,7 a.l.) e una profondità ottica fotografica fino a $\tau_f = 4,5$, convertita nella profondità ottica adottata dal modello tramite $\tau_v = \min[8, \tau_f(1 + 2,6 \tau_f)]$ — una regola dichiarata, non una misura indipendente. Gli strati sono lamine dotate di spessore: l'emissione di ricombinazione in una lamina centrata 15 a.l. dietro il piano dei Pilastri ($\sigma = 3$ a.l., minimo del 2%), le fasce e la nube madre a 8,5 a.l. ($\sigma = 2$ a.l.), le stelle dell'ammasso in un piano comune 3,2 a.l. dietro il piano dei Pilastri. La luce vista sopra un assorbitore è trattata come un velo emesso in uno strato da 0,1 a 1,4 a.l. davanti a esso, con lo spettro di fondo. La diffusione della luce stellare usa albedo 0,5 e funzione di fase di Henyey–Greenstein con $g = 0,6$; l'opacità $\kappa = 6 \text{ a.l.}^{-1}$; il continuo diffuso è un corpo nero di 37.755 K. La luminosità assoluta è fissata da un'unica misura di emissione, $10^5 \text{ cm}^{-6} \cdot \text{a.l.}$ ($\approx 100 \text{ e}^-/\text{cm}^3$ su 10 a.l.), un valore plausibile per eccesso.

Il trasporto è una marcia dei raggi nel sistema di riferimento di quiete della nebulosa, con 224 campioni (24 davanti, 160 nell'intervallo sottile delle fasce e dei Pilastri, 40 dietro): emissione di righe, continuo diffuso e assorbimento grigio sono integrati in ordine lungo il raggio; la radianza è trasformata per Doppler e aberrazione alla fine (le righe spostate di λ/D escono dal visibile durante l'avvicinamento — $H\alpha$, a 656 nm, si trova a 234 nm al 77% di c); il passo conserva, oltre alla radianza premoltiplicata, la profondità di uscita (codificata come $\log_2(1 + d)/34$, la stessa del passo delle stelle) e la profondità ottica cumulativa in quattro punti, in modo che le stelle dietro il materiale siano attenuate da ciò che si trova effettivamente davanti a loro. Il livello di dettaglio delle texture è scelto in base all'angolo di quiete per pixel apparente, che cresce con il fattore Doppler: la nebulosa non acquista mai più dettaglio angolare di quanto ne abbia il piano fotografico, né presenta aliasing quando è lontana. La distribuzione volumetrica adottata non è determinata univocamente dalle osservazioni: la spettroscopia fornisce vincoli su velocità, densità elettronica, estinzione e geometria relativa dei Pilastri [15], ma non stabilisce il campo tridimensionale completo di densità ed emissività qui usato; le posizioni e gli spessori degli strati, il piano comune delle stelle e la profondità attribuita alla mesh sono ipotesi documentate del modello. La Sezione 11 riassume ciò che in questo modello è ipotesi.

7. Propulsione, energia e il flusso sullo scudo

7.1 Razzo a fotoni

Si adotta un razzo a fotoni perfetto: tutta la massa di combustibile è convertita in radiazione collimata nel verso opposto alla spinta. Per questo propulsore l'equazione relativistica del razzo dà $m(\tau) = m_{\text{fim}} e^{b_{\text{fim}} - b(\tau)}$, dove b è la rapidità accumulata dalla spinta, (3): $b = b_1 + \eta - \eta_1$ nell'accelerazione e $b = b_F + \eta_F - \eta$ nella frenata, con $b_F = b_1 + \eta_F - \eta_1$ e $b_1 = 2,83 \times 10^{-3}$ la combustione dell'ascesa. Con massa a secco $m_{\text{fim}} = 100 \text{ t}$:

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

ciò che il Sole emette in 1.221 s. La potenza del fascio, nel sistema di riferimento istantaneo della nave, è $P = m \cdot a_{\text{emp}} \cdot c$. All'inizio del decollo, con spinta di 1,1 g, vale circa $1,68 \times 10^{22} \text{ W}$; per confronto, il riferimento $P_{\text{ref}} = m g_0 c$ adottato nel modello vale $1,53 \times 10^{22} \text{ W}$ con la massa iniziale. Durante la frenata a 1 g, la potenza passa da $2,1 \times 10^{18} \text{ W}$ all'inversione a $2,9 \times 10^{14} \text{ W}$ immediatamente prima dell'arresto, quando il motore viene spento; nella frenata il fascio punta in avanti rispetto al moto. La frazione di combustibile usata è $(1 - e^{-b}) / (1 - e^{-b_{\text{fim}}})$ e la riserva si azzerà esattamente all'arresto; il pannello dei sistemi mostra la riserva, e la formattazione usata dalla radio di bordo la calcola direttamente, $e^{-b}(1 - e^{b - b_{\text{fim}}}) / (1 - e^{-b_{\text{fim}}})$, per non perdere le ultime cifre per cancellazione, componendo le due percentuali in aritmetica decimale intera (la somma chiude a 100% senza arrotondare la riserva a zero prima della fine). Un fascio collimato non è visibile lateralmente nel vuoto senza un qualche meccanismo di diffusione; nel mezzo interstellare, il suo aspetto dipenderebbe dallo spettro del fascio e dalle proprietà e dalla distribuzione del gas e della polvere. Questa diffusione non è calcolata dal simulatore; per questo il suo contributo visivo è stato omissso — non ci sono pennacchi né bagliori — e la frenata è indicata dagli strumenti.

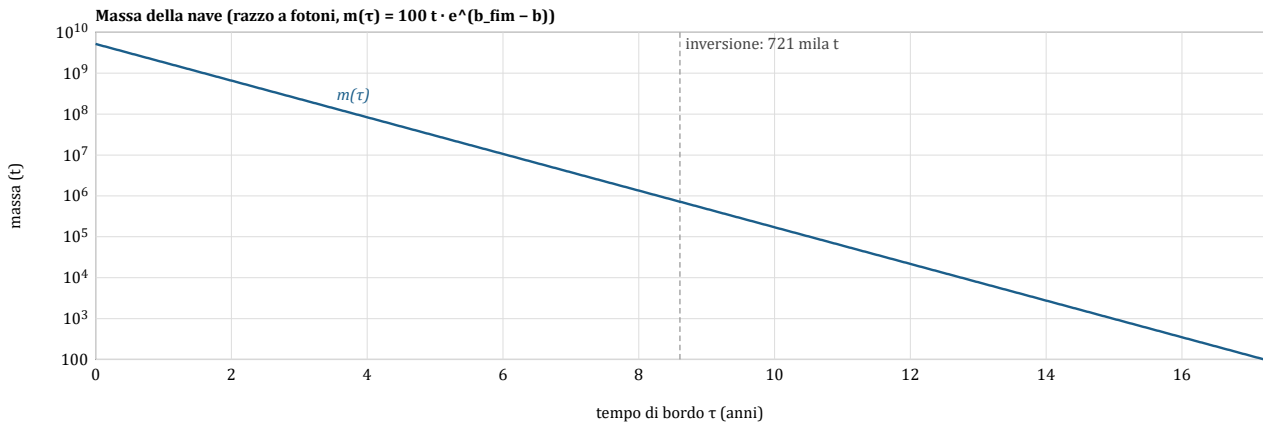


Figura 4. Massa totale della nave lungo il viaggio per il razzo a fotoni ideale con 100 t di massa a secco: $5,20 \times 10^9 \text{ t}$ alla partenza, $7,21 \times 10^5 \text{ t}$ all'inversione e 100 t all'arresto; in scala logaritmica la curva è una retta in ciascun tratto, perché la combustione b è la rapidità accumulata stessa.

7.2 Mezzo interstellare e scudo

Il gas interstellare arriva alla prua come un fascio di protoni di energia cinetica $(\gamma - 1)m_p c^2$, con densità γn nel sistema di riferimento della nave. Il flusso di energia su una superficie normale al moto è

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

scritto nella seconda forma per evitare $\gamma - 1$ a bassa velocità. Con $n = 0,1 \text{ cm}^{-3}$, la densità della Bolla Locale adottata per tutto il viaggio, $W = 5,9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ all'inversione (3,4 TeV per protone), circa 930 volte l'emittanza della superficie del Sole; la temperatura di equilibrio radiativo di una faccia, $(W/\sigma)^{1/4}$, è $\sim 32.000 \text{ K}$. Il blocco SCUDO del pannello dei sistemi mostra queste grandezze e presuppone uno scudo capace di sopportarle. Semyonov [16, 17] mostra che il gas ricevuto è la fonte di radiazione dominante di un volo relativistico, al di sopra dei raggi cosmici, e che impone una schermatura reale; la simulazione non modella dose, erosione da polvere né radiazione secondaria (Sezione 11).

8. Incontri scenografici

8.1 Posizioni e velocità

Su una retta dalla Terra a M16 la nave non passerebbe vicino ad alcun corpo del Sistema Solare. Perché il viaggio avesse qualcosa da mostrare nei primi giorni, Luna, Marte, Cerere, Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone sono collocati nel punto in cui la nave attraversa il raggio orbitale medio di ciascuno, su lati alterni della rotta, a 1,5 raggi dal centro (Saturno a 1,55 R e 0,18 R sopra il piano degli anelli; Urano a 1,5 R, attraverso l'apertura tra la prima e la seconda fascia, con più di 300 km di margine); le lune di Giove hanno raggi reali (1.821, 1.560 e 2.634 km) in posizioni fisse, Caronte (606 km) si trova a (9.000; 5.000; 12.000) km da Plutone — 15.800 km, circa il 20% in meno della separazione reale di ~19.600 km — e la fascia degli asteroidi è rappresentata da venti rocce di 20–92 km. L'istante di ogni passaggio è il traguardo fisico del raggio orbitale (Appendice B), e la velocità è quella della traiettoria: lo spostamento per fotogramma è $\gamma\beta c \cdot \Delta\tau$ — la Luna attraversa il diametro in 41 s a 307 mila km/h; Plutone passa a 38,7 milioni di km/h, in 0,22 s. Non c'è rallentatore, fionda gravitazionale né perturbazione della rotta.

8.2 Rappresentazione

I corpi sono sfere texturizzate (Solar System Scope, CC BY 4.0, con riempimenti delle regioni non osservate; Plutone da New Horizons con lacune; Cerere fittizia) illuminate da una direzione fissa, normalize(−0,48; 0,65; −0,90), e non dal Sole — la fase mostrata non è quella reale. L'aberrazione è applicata alla posizione e alla dimensione angolare di ogni corpo, ma non c'è spostamento Doppler del colore né guadagno D^4 sulle texture: nei passaggi planetari $\beta \leq 0,036$, il che omette fino al 3,7% di spostamento spettrale e fino al 15,5% di guadagno di radianza (D^4) per un corpo davanti; nella Nube di Oort $\beta = 0,25$ e il fattore $D \approx 1,3$ quasi triplicherebbe già la radianza. Gli anelli di Saturno sono materiale sintetico con le fasce C (1,275–1,58 R_S), B (1,58–2,018), divisione di Cassini (2,018–2,10), A (2,10–2,349) ed Encke (2,291–2,297), con $R_S = 58.232$ km nella scena: in chilometri i bordi si trovano a 74.246 (C interno; NASA 74.658), 92.007 (C/B; 91.975), 117.512 (B esterno; 117.507), 122.287 (A interno; 122.340) e 136.787 km (A esterno; 136.780) — differenze fino allo 0,55%; ciò che è sintetico è la texture. Gli anelli di Urano sono sette fasce scenografiche centrate da 1,62 a 2,07 R_U a passi di 0,075 R_U , con larghezze da 400 a 1.500 km, ingrandite per la visibilità: gli anelli reali sono larghi da 1 a 10 km (l'ε, da 20 a 100 km). Hanno trasparenza e ombra, senza emissione propria.

8.3 Nube di Oort e Bolla Locale

A partire da 2.000 UA dal Sole (giorno 90,2 di bordo, $\beta = 0,25$) un tratto di 24 ore di bordo presenta nove gruppi di tre corpi ghiacciati da 35 a 125 km, con texture lunare, che passano fino a 4.500 km dalla nave tra le 00h00 e le 23h52 di bordo; la fine del giorno chiude solo la sequenza — il modello colloca l'uscita dalla nube a 100.000 UA, al giorno 574. La nube reale è dedotta, non osservata; i corpi di più di 1 km distano decine di UA l'uno dall'altro, e la probabilità di passare a 10 mila chilometri da uno di essi in 24 ore è essenzialmente nulla. La "parete" di filamenti della Bolla Locale è una transizione gaussiana ($\sigma = 0,003$ a.l.) a 300 a.l., disegnata in coordinate dello schermo con rumore frattale senza Doppler né aberrazione; la bolla reale è gas caldo, invisibile nell'ottico e senza un bordo netto, e a 300 a.l. la nave è già a $\gamma \approx 310$. I traguardi eliosferici (shock di terminazione a 90 UA, eliopausa a 120 UA, Voyager 1 a 165 UA più 3,57 UA/anno dal 2025, fascia di Kuiper a 40 UA) sono valori arrotondati, misurati come distanza dal Sole.

9. Strumenti, diario e radio di bordo

9.1 Pannelli

Tutti i pannelli sono funzioni pure dello stato (Sezione 2.3), formattate in moduli senza accesso al documento e testate in Node. Il pannello della velocità mostra la velocità in km/h, la frazione di c con almeno due cifre significative della differenza dal 100% (99,9999962% all'inversione), la velocità propria $\gamma\beta c$ in unità dinamiche (km, mila km, milioni di km, UA per secondo di bordo) e il *nastro della rapidità*: poiché η cresce allo stesso ritmo a ogni giorno di bordo, la nave avanza lungo il nastro a passo costante, e le tacche del 50%, 90%, 99%, ... 99,99999% di c , in $\eta = \frac{1}{2} \ln((2 - \epsilon)/\epsilon)$, risultano quasi equidistanti. Il pannello del tempo mostra il vantaggio della Terra, $t_{\oplus} - \tau$, su una scala a fondo scala 1-2-5 con unità dinamica a partire dai picosecondi (al di sotto la differenza resta sotto la risoluzione dell'integrazione nei primi secondi) e il fattore γ in scala logaritmica; la massa, anch'essa in scala logaritmica, si trova nel pannello "Massa e combustibile", accanto alla riserva. La mappa di navigazione ha un ciclo di 64 s: 10 s nella vista generale, 2 s di avvicinamento, 50 s nella vista locale e 2 s di ritorno, con la nave che continua a spostarsi sul righello durante le transizioni. La vista generale mappa la posizione con $X = \frac{1}{2} \ln(1 + k u)/\ln(1 + k)$ prima dell'inversione, con $u = (r - R_{\oplus})/(r_F - R_{\oplus})$ e $k = 10^{12}$, e con $X = 1 - \frac{1}{2} \ln(1 + k w)/\ln(1 + k)$ dopo, con $w = (D - r)/(D - r_F)$ valutato con la (8): il righello passa dalla distanza percorsa alla distanza restante all'inversione, e sia i primi chilometri sia gli ultimi anni luce restano visibili; Terra e Plutone sono riferimenti fissi del Sistema Solare, con il prossimo incontro evidenziato. La vista locale mostra due traguardi — il precedente e il successivo, con distanze arrotondate nell'unità visualizzata e priorità agli incontri — e, quando il traguardo è lontano, un riferimento assoluto arrotondato con incrementi locali, affinché il movimento resti percepibile; le letture inferiori differiscono tra le due viste, e la distanza a bordo fino all'arresto è la distanza restante divisa per γ . Il pannello della radiazione disegna λB_{λ} normalizzato al proprio picco per il Sole a poppa e il CMB a prua, e confronta, su una fascia di energia, l'irradianza solare $L_{\odot}/(4\pi d^2) \cdot D^2$ con l'irradianza del CMB alla prua (Sezione 5): il fondo cosmico supera il Sole prima del primo anno di bordo; all'inversione sono 217 W/m^2 contro $5,4 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2$ del Sole a poppa — un fattore $\approx 4 \times 10^{23}$ — e, all'arrivo, con la nave ferma, $\approx 5 \times 10^8$. La telecamera posteriore compone la Terra o il Sole con la data di emissione, l'età della luce e il fattore di rallentamento (9); il finestrino anteriore e quello posteriore sono aggiornati a 10 e 5 Hz in crociera.

9.2 Luce della cabina

La cabina è un'immagine unica con tre strati di luce calcolati: un ciclo circadiano (giorno dalle 07 h alle 19 h, notte dalle 22 h alle 05 h al 55% con tinta calda, rampe tra i due) in moltiplicazione; la luce che entra dal finestrino, in addizione — la somma della luce diurna della Terra durante l'ascesa ($0,15 \cdot e^{-h/8.500 \text{ m}}$) con l'irradianza del CMB convertita tramite la frazione visibile del corpo nero alla temperatura della prua e normalizzata per 550 W/m^2 , il che dà lo 0,32% della luce solare visibile a 7 anni e il 5,37% all'inversione (un'approssimazione dell'illuminazione: la temperatura del CMB varia con la direzione e il coefficiente usa quella della prua); e un riflesso del vetro, la cui opacità $0,09 \cdot \text{livello}/(1 + \text{luce esterna}/0,005)$ cede quando c'è luce dall'esterno. La targa del costruttore e le ombre della cabina seguono questi strati; non c'è fotometria calibrata.

9.3 Diario e radio

Il diario di bordo è generato da moduli di traguardi che ricevono la funzione di stato e un risolutore per bisezione: ogni traguardo (fuga, orbite, 1 giorno luce, eliopausa, Oort, temperature del CMB, angolo dimezzato dell'aberrazione, "+100 anni sulla Terra", stelle di riferimento come Proxima, Sirio, Vega e Betelgeuse, soglie di velocità, inversione, arrivo) è un istante τ calcolato, non scritto a mano, e 108 fatti di

contesto accompagnano i traguardi con la fonte annotata nel codice. La radio di bordo è una striscia di notizie con 2.415 battute prescritte (241 originali e 2.174 di un'espansione), a tre voci — la Borealis e due dipendenti fittizi, la signora Rosa, della Direzione Conformità e Integrità Patrimoniale, e il signor Franco, del Supporto Operativo e Imprevisti. I commenti del catalogo seguono una restrizione editoriale sulle cifre, con eccezioni per "1 g" e "24 h/24 ore"; l'analizzatore preserva anche il motto approvato della nave. I numeri in lettere sono consentiti nell'umorismo amministrativo, ma non per introdurre dati fisici. I valori dei bollettini provengono dalla simulazione; la revisione editoriale e i test verificano che i commenti non inventino letture o guasti né contraddicano i traguardi. La distribuzione è deterministica: ogni battuta ha una fase di volo e un argomento, è selezionata in base al traguardo precedente o successivo e a finestre di prossimità, non si ripete prima di 15 min (cronologia delle ultime 24), e le risposte dei personaggi scadono dopo 5 min o quando cambia la fase; i messaggi diventati obsoleti vengono scartati. Non c'è generazione di testo tramite IA in tempo reale.

10. Implementazione e robustezza numerica

10.1 Architettura

L'applicazione è statica: HTML, CSS, JavaScript (moduli ES) e WebGL2, senza librerie di runtime. La funzione di stato (Sezione 2) è pura e deterministica; il ciclo dei fotogrammi legge l'orologio, calcola lo stato e aggiorna pannelli, cielo, telecamera posteriore e radio. Il cielo usa un passo HDR di punti (stelle, con PSF gaussiana e disco fisico quando risolto), un passo di sfondo (Via Lattea diffusa, Terra, atmosfera), un passo volumetrico per la nebulosa (a metà risoluzione finché i Pilastrini non occupano più di 40 px) e un passo finale di composizione che somma il CMB a 32 bit e applica la (13). Le frequenze dei fotogrammi sono scelte per fase: 60 Hz nei passaggi ravvicinati, 30 Hz nei primi due giorni, 10 Hz in crociera (5 Hz nella telecamera posteriore), perché in crociera nulla cambia alla scala del fotogramma.

10.2 Formulazioni stabili

Diverse grandezze del viaggio hanno rapporti dell'ordine di 10^7 – 10^{19} tra partenza e inversione, e la doppia precisione ($2^{-52} \approx 2,2 \times 10^{-16}$) non basta per le forme ingenue. Le scelte:

- **Rapidità come variabile di stato.** η è lineare in τ (5); β , γ ed $\varepsilon = 1 - \beta$ ne sono derivati: $\varepsilon = 2/(e^{2\eta} + 1)$ evita la cancellazione di $1 - \tanh \eta$ (che satura a 10^{-16}) e rappresenta valori molto più piccoli, entro i limiti della virgola mobile. All'inversione $\varepsilon = 3,84 \times 10^{-8}$: la velocità è a 41,5 km/h da c e questo numero è mostrato con due cifre significative.
- **Distanza mancante.** $D - r$ perderebbe gli ultimi chilometri di $6,6 \times 10^{19}$ m (a questa grandezza la spaziatura tra i double è 8.192 m); la frenata usa la (8), che va a zero con continuità, e la mappa della rotta converte in chilometri a partire da essa.
- **Differenze di funzioni iperboliche.** La (6) usa le identità prodotto-somma invece di $\cosh \eta - \cosh \eta_1$, che perderebbe cifre all'inizio della fase 2.
- **Doppler e aberrazione.** La (10) e la (11) non formano mai $1 - \beta \cos \theta$; l'angolo è propagato come $\tan(\theta/2)$, con i rami $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$ e $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$; il limite $\tan(\theta'/2) > 10^{15}$ è trattato come $\theta' = \pi$. La composizione con il dipolo solare calcola $\gamma - |\gamma\beta|$ come $e^{-\eta}$.
- **Combustibile.** Frazioni tramite $\exp m1/\exp$ e riserva calcolata direttamente; nella formattazione della radio, percentuali in interi decimali (BigInt) affinché 99,9...% e 0,0...1% sommino a 100% senza arrotondare la riserva a zero.
- **Fondo cosmico.** Radianza in tabella logaritmica; temperatura tramite $|d - \text{asse}|^2$, stabile all'apice; integrazione per pixel con conservazione del flusso, criterio di suddivisione in unità angolari; somma a

32 bit fuori dal *buffer* a mezza precisione delle stelle, che è limitato a 60.000 per non andare in overflow.

- **Profondità.** Codifica logaritmica $\log_2(1 + d)/34$, con d in anni luce, condivisa tra stelle e nebulosa: un intervallo di molti ordini di grandezza nello stesso *buffer* — intervallo rappresentabile, non risoluzione; in float32 il termine $1 + d$ perde gli incrementi al di sotto di $\sim 10^{-7}$ a.l.
- **Orologio.** Allineamento con il server tramite HEAD (una stima, Sezione 3.1); T_0 e i tempi sono interi di millisecondi; $\tau = t - T_0$ è esatto in doppia precisione per $\sim 10^5$ anni.

10.3 Verifica

Il repository include 128 test automatici in 19 file (Node.js), eseguiti a ogni modifica, e due pagine di verifica nel browser (806 verifiche della mappa della rotta e 2.804 dei test della radio). Tra i test fisici: l'irradianza del CMB rispetto ai suoi due limiti analitici; l'emissività $H\alpha$ rispetto alla relazione misura di emissione-Rayleigh; l'arresto con $v = 0$ e combustione totale a τ_{fim} ; la velocità nei passaggi (spostamento = $\gamma\beta c \cdot \Delta\tau$); la stabilità del CMB dopo un'ora simulata e l'indipendenza dalla cronologia; l'assenza di un picco artificiale a poppa; l'immagine della Terra nella telecamera posteriore; e una replica su CPU dello shader dei punti sulle 109.400 stelle dell'HYG, che fissa il limite di magnitudine in quiete (raggruppate per parte intera della magnitudine: ogni stella fino a mag 7 visibile; il 30–60% di quelle di mag 8; nessuna di mag 9; 50.000–62.000 visibili nell'intero cielo), il colore bianco di Sirio, l'aumento delle stelle davanti con 1 anno di bordo, la predominanza di stelle fredde spostate a 3 anni e l'anello di 1° con 300–2.000 stelle all'inversione. La pulizia della versione 1.0 è stata verificata con un confronto pixel per pixel di uno stato congelato (0,03% di pixel diversi, solo cifre che cambiano con l'orologio). I numeri di questa sezione si riferiscono alla versione 1.1.0 del sito, del 19/10/2026: i test si eseguono con `node --test check-*.mjs` nella cartella `hybrid/`, e le pagine di verifica si aprono nel browser (`check-route.html`, `check-radio.html`); le fonti dei dati e della mesh, con gli hash dei file, si trovano nella pagina "Fonti e crediti". Questi test verificano la coerenza interna con il modello; non sono una validazione osservativa — superarli non calibra le fotografie né dimostra che un occhio umano vedrebbe quella luminosità.

10.4 Pubblicazione e tempo reale

Il sito è pubblicato come file statici; la pubblicazione imprime la versione, un identificatore di build e l'istante $T_0 = 1792422000000$ ms (epoca Unix), sigillato: ogni pubblicazione successiva ripete lo stesso T_0 , e le scorciatoie temporali usate nello sviluppo sono ignorate nella copia pubblicata. L'istante è unico per tutti i visitatori; lo stato mostrato è la funzione di stato valutata sull'orologio reale.

11. Limitazioni e problemi noti

Le semplificazioni sono elencate per il pubblico nella pagina "Licenza poetica"; qui sono organizzate per tipo, con ciò che si sa della loro entità.

11.1 Impossibilità assunte

- **Propulsione.** Non esiste un razzo a fotoni perfetto. Il rapporto di massa di $5,2 \times 10^7$ per 100 t di massa a secco totale, e la potenza di $1,68 \times 10^{22}$ W alla partenza, sono al di fuori di qualsiasi ingegneria conosciuta. In un modello semplificato con una frazione costante $1 - f$ dell'energia di massa persa emessa in fotoni collimati, e il resto che sfugge isotropicamente nel sistema di riferimento istantaneo della nave, il rapporto di massa è $e^{b_{\text{fim}}/(1-f)}$: come esempio ipotetico, un'efficienza del 50% porta il rapporto da $5,2 \times 10^7$ a $2,7 \times 10^{15}$ — questa percentuale non rappresenta un'efficienza universale dei motori ad antimateria. La massa di serbatoi, radiatori e riserva è zero.

- **Scudo ed equipaggio.** Flusso di $5,9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ ($n = 0,1 \text{ cm}^{-3}$) senza effetto sulla nave; dose, erosione da grani, radiazione secondaria e ionizzazione non modellate; inversione istantanea; 1 g ininterrotto dopo l'ascesa, nell'accelerazione e nella frenata (zero all'arresto); nessun supporto vitale.
- **Lancio.** Ascesa verticale senza atmosfera, resistenza aerodinamica, rotazione (465 m/s) od orbita della Terra (29,8 km/s), senza orbita di parcheggio; partire da un'orbita di 400 km cambierebbe lo 0,008% del combustibile e 41 min di bordo. La direzione dell'ascesa è quella della rotta, il che richiederebbe M16 allo zenit della base al T_0 ; a mezzogiorno del 19/10/2026 si trovava a $\sim 30^\circ$ di altezza a quella longitudine, e l'orientamento visivo fisso della Terra nasconde la differenza.

11.2 Limiti dei dati

- **Distanza.** 7.000 a.l. dal centro di M16 è il valore classico; le parallassi Gaia DR2 danno $1.740 \pm 130 \text{ pc} \approx 5.700 \pm 400 \text{ a.l.}$ per NGC 6611 [18]. La differenza cambia poco il tempo di bordo ($17,2 \rightarrow 16,8$ anni, per via del logaritmo nella (7)), ma cambia di ~ 1.300 anni il tempo sulla Terra e scala tutte le dimensioni della nebulosa (altezza dei Pilastri $8,6 \rightarrow 7,0 \text{ a.l.}$).
- **Nebulosa.** Tutta la profondità è ipotesi: lamine, piano comune delle stelle, esponente dell'enfatizzazione, conversione $\tau_f \rightarrow \tau_v$, albedo, g , κ , un'unica misura di emissione; solo otto delle ~ 500 stelle dell'ammasso illuminano il gas; spettro di righe di un solo punto, solo ottico; nessuna diffusione multipla; la nebulosa è mostrata come nelle fotografie — luce emessa ~ 6.992 anni prima del 2026, alla distanza adottata —, mentre all'arrivo, 6.987 anni terrestri dopo la partenza, la nave riceve luce emessa ~ 7 anni prima di quell'istante: tra le due epoche osservate passano ~ 14.000 anni di evoluzione non modellata. In base al tasso di fotoevaporazione misurato (McLeod et al. [15]: $\sim 70 M_\odot/\text{Myr}$, vita $\sim 3 \text{ Myr}$) il cambiamento sarebbe piccolo. L'ipotesi di una supernova recente a partire dai dati Spitzer [19] è un'ipotesi divulgativa; le immagini Hubble del 1995 e del 2014 [13] registrano solo piccoli cambiamenti nei Pilastri.
- **Cataloghi.** 299.858 stelle contro miliardi reali; mancano le deboli e le lontane, in particolare quelle che l'aberrazione porterebbe nel finestrino vicino a M16; l'addendum Gaia non ha velocità (resta fermo) ed è stato selezionato con un asse di rotta $0,1^\circ$ precedente a quello attuale; temperature per colore o classe, spettri senza righe.
- **Polvere.** Modello di disco liscio (12), senza le nubi reali in direzione di Serpens/Aquila; Via Lattea diffusa e galassie esterne sintetiche.
- **Moto di M16.** Nessuna velocità relativa Sole-ammasso; la scala di ciò che si ignora è $0,024 \text{ a.l.}$ in 7.000 anni per km/s.

11.3 Scelte di scena

- **Incontri.** Pianeti collocati all'incrocio del raggio orbitale, su lati alterni, a 1,5 raggi; illuminazione da direzione fissa (fase non reale); nessun Doppler del colore né guadagno di radianza sui pianeti (fino al 3,7% in frequenza e al 15,5% in radianza con $\beta \leq 0,036$; nella Nube di Oort, $\beta = 0,25$ e $D \approx 1,3$ quasi triplicherebbero la luminosità); anelli di Saturno sintetici, con bordi entro lo 0,55% da quelli reali; anelli di Urano con fasce larghe 400–1.500 km contro 1–10 km reali; lune di Giove fisse; Caronte $\sim 20\%$ più vicino a Plutone che nella realtà; venti rocce come fascia degli asteroidi; Nube di Oort con nove gruppi inventati in 24 h (frequenza reale ≈ 0); "parete" della Bolla Locale a 300 a.l., artistica.
- **Terra.** Mappa Blue Marble del 2004 con nuvole storiche; la Terra mostrata non ruota (meridiano e terminatore del T_0); niente meteorologia, stagioni o luci urbane.
- **Cabina e percezione.** Un'immagine unica con strati di luce; niente suono, vibrazione o peso; telecamera a esposizione fissa, senza adattamento dell'occhio né calibrazione fotometrica del monitor; il riflesso del vetro è uno strato visivo, non una simulazione ottica.

- **Narrazione.** La nave, la base, la targa e la radio di bordo (2.415 battute, personaggi fittizi, senza letture né guasti inventati) sono finzione; l'azienda è reale.

11.4 Incoerenze interne note

- La densità del mezzo nel calcolo dello scudo è $0,1 \text{ cm}^{-3}$ per tutto il viaggio, mentre la stima della luminosità diffusa dello scarico usa 1 cm^{-3} lungo la rotta e 100 cm^{-3} nella cavità di M16; all'interno dell'eliosfera il valore è ancora un altro. Il calore sullo scudo varia di un fattore 10 a seconda della scelta.
- La luminosità solare compare come $3,83 \times 10^{26} \text{ W}$ nelle unità del pannello dell'energia e come $3,828 \times 10^{26} \text{ W}$ nei traguardi (0,05%).
- I testi del diario chiamano il punto finale "arrivo ai Pilastri", mentre la mappa lo chiama arresto, a 6,9 a.l. dalla faccia più vicina.

11.5 Ipotesi e sensibilità del modello

- La temperatura di equilibrio dello scudo usa l'irraggiamento da una faccia; da due facce sarebbe inferiore di un fattore $2^{-1/4}$ (16%).
- L'enfatizzazione fotografica invertita (esponente 2,4), il fattore 1,725 della mesh, il tetto $\tau_v \leq 8$ e la griglia di $142 \times 234 \times 218$ sono scelte progettuali documentate, non misure; cambiarle cambia l'aspetto della nebulosa senza contraddire alcun dato.

12. Conclusione

La Borealis Horizon mostra che un viaggio relativistico può essere presentato al pubblico con i numeri giusti, in tempo reale, per 17 anni, con un codice che sta in un browser: cinematica in forma chiusa, luce trasformata direzione per direzione, fondo cosmico calcolato dalla legge di Planck e una nebulosa costruita a partire da osservazioni pubbliche, il tutto sotto esposizione fissa e con scelte visive documentate. Il prezzo sono le semplificazioni dichiarate — un motore e uno scudo che non esistono, una distribuzione volumetrica della nebulosa che le osservazioni da sole non determinano, pianeti collocati dove fanno bella figura — e questo documento le rende esplicite, con l'entità di ciascuna, affinché il lettore sappia esattamente che cosa sta vedendo.

Bibliografia

- [1] Rindler, W. *Relativity: Special, General, and Cosmological*. 2ª ed., Oxford University Press, 2006.
- [2] Møller, C. *The Theory of Relativity*. 2ª 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 dell'angolo dimezzato dell'aberrazione segue dalla trasformazione di Lorentz dei coseni direttori.
- [5] Peebles, P. J. E.; Wilkinson, D. T. "Comment on the anisotropy of the primeval fireball". *Physical Review* 174, 2168 (1968) — radianza $\propto D^4$ e invarianza di I_ν/ν^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 per 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->

- [10] Particle Data Group, "Cosmic microwave background", *Review of Particle Physics* (2025), eq. 29.2: $T_0 = 2,7255$ K; dipolo 369,82 km/s verso (l, b) = (264,021°, 48,253°). 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) e comunicato 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* (gennaio 2004) e *Blue Marble Clouds*.
- [21] Solar System Scope. *Solar System Textures* (CC BY 4.0); NASA/JHUAPL/SwRI, mappa di Plutone (New Horizons).
- [22] Ashby, N. "Relativity in the Global Positioning System". *Living Reviews in Relativity* 6, 1 (2003).

Appendice A. Costanti e parametri

Simbolo	Valore	Uso
c	299.792.458 m/s	esatto
g_0	9,80665 m/s ²	accelerazione propria di crociera
anno	365,25 d = 31.557.600 s	anno luce = $9,4607 \times 10^{15}$ m; calendario di bordo
UA	$1,495978707 \times 10^{11}$ m	velocità propria, traguardi
$R_{\oplus}$	6.371 km	$GM = g_0 R_{\oplus}^2$
T_0 (CMB)	2,7255 K	monopolo
dipolo solare	369,82 km/s; (l, b) = (264,021°, 48,253°)	composizione con il boost della nave
σ	$5,670374419 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$	irradianza, scudo
$m_p c^2$	$1,50327759 \times 10^{-10}$ J (938,27 MeV)	flusso sullo scudo
n	0,1 cm ⁻³	densità del mezzo (scudo)
m_{fim}	100 t	massa a secco
D, distanze	7.000 a.l. (centro di M16); 6.992 a.l. (piano dei Pilastri); 6.985 a.l. (arresto)	rotta
direzione della rotta	l = 16,890922°, b = 0,753177°	terzo superiore dei Pilastri
polvere	K = $5,1 \times 10^{-4}$ a.l. ⁻¹ ; H = 330 a.l.; $z_{\odot}$ = 65 a.l.; canali (-0,18; 0; 0,30)	estinzione
esposizione	$E_{\text{buio}} = 5.400$ a 1.200 px/rad; $\sigma_{\text{PSF}} = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad})$	cielo
nebulosa	scala 1,725; lamine 15 a.l. (σ 3), 8,5 a.l. (σ 2), stelle 3,2 a.l.; $\tau_v = \tau_f(1 + 2,6\tau_f)$; albedo 0,5; g = 0,6; $\kappa = 6 \text{ a.l.}^{-1}$; 224 campioni	trasporto

Profondità ottica della (12) lungo un segmento di lunghezza d tra le altezze z_0 e z_1 (misurate dal piano): $\tau = K d e^{-|z|/H}$ se $|z_1 - z_0| < 10^{-3} d$, e, in caso contrario, $\tau = (K d / \Delta z) [\text{sgn}(z_1) H (1 - e^{-|z_1|/H}) - \text{sgn}(z_0) H (1 - e^{-|z_0|/H})]$.

Appendice B. Traguardi del viaggio

Traguardo	Tempo di bordo	Stato
Fuga dalla gravità terrestre ($v^2 = 2GM/r$)	44 min	ascesa a 0,1–1 g netto
Luna (raggio orbitale)	2,98 h	307 mila km/h; 41 s per attraversare il diametro
Fine dell'ascesa (inizio della forma chiusa)	24 h	$34,9 \times 10^6$ km; 827 km/s
Marte · Cerere · Giove	2,19 · 3,27 · 4,59 d	passaggi scenografici a 1,5 raggi
Saturno · Urano · Nettuno · Plutone	6,25 · 8,87 · 11,1 · 12,7 d	Plutone a $38,7 \times 10^6$ km/h
Nube di Oort (2.000 UA)	90,2 d	$\beta = 0,25$; uscita dal modello (100.000 UA) al giorno 574
Bolla Locale (300 a.l.)	6,23 anni	$\gamma \approx 310$
CMB a 1.000 K alla prua	5,72 anni	Tabella 2
Inversione	8,606 anni	$\gamma = 3.606$; 3.493 anni sulla Terra; 3.492,5 a.l.
Arresto	17,211 anni	6.985 a.l.; 6.987 anni sulla Terra; $v = 0$; combustibile zero

Borealis Dynamics · Borealis Horizon, versione 1.1.0 · Le fonti e le licenze di ogni risorsa si trovano nella pagina "Fonti e crediti" del sito; le semplificazioni, nella "Licenza poetica"; le modifiche di ogni versione, in "Versioni". Il sito è non commerciale, educativo e gratuito.