

Borealis Horizon: perjalanan relativistik waktu nyata menuju Pilar Penciptaan — model, implementasi, dan batasan

Borealis Dynamics

Eksperimen publik di <https://ngc6611.pages.dev> · situs versi 1.1.0 · lepas landas pada 19 Oktober 2026, 12:00 (UTC-3) · dokumen tertanggal 19/10/2026

ABSTRAK

Borealis Horizon adalah simulasi publik berbasis peramban dari sebuah perjalanan antarbintang dengan percepatan proper konstan 1 g dari Bumi hingga sebuah titik 7 tahun cahaya sebelum Pilar Penciptaan (M16), dengan menempuh 6.985 tahun cahaya dalam kerangka acuan Bumi. Simulasi berjalan dalam waktu nyata sejak saat keberangkatan yang ditetapkan pada saat publikasi: pada setiap detik waktu kapal, pengamat melihat keadaan kinematik yang diprediksi oleh model — diperoleh melalui integrasi numerik pada fase naik dan melalui ungkapan bentuk tertutup pada fase relativistik percepatan dan pengereman — serta langit yang akan direkam oleh kamera dengan eksposur tetap. Artikel ini mendokumentasikan model fisis (gerak hiperbolik dalam bentuk tertutup dengan fase awal newtonian yang diintegrasikan dengan Runge-Kutta; dilatasi waktu; tunda sinyal dan horizon percepatan; aberasi dan pergeseran Doppler pada warna dan kecerahan; ekstingsi antarbintang; latar gelombang mikro kosmik yang ditransformasikan arah demi arah; rekonstruksi tiga dimensi Nebula Elang dari foto-foto publik; roket foton ideal), pilihan implementasi (formulasi yang stabil secara numerik untuk γ hingga $\sim 10^4$, tabel yang dihitung sebelumnya, integrasi yang mengonservasi fluks, verifikasi dengan uji regresi), serta batasan yang diketahui. Dengan $\gamma = 3.606$ pada pembalikan, 17,21 tahun waktu kapal, dan 6.987 tahun di Bumi, perjalanan ini disajikan sebagai eksperimen visualisasi: setia di mana fisika dapat dihitung dan disederhanakan secara terbuka di mana rekayasa atau datanya tidak ada.

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.

Kata kunci: relativitas khusus; gerak hiperbolik; aberasi; efek Doppler; latar gelombang mikro kosmik; Nebula Elang; visualisasi ilmiah; WebGL. **Keywords:** special relativity; hyperbolic motion; aberration; Doppler effect; cosmic microwave background; Eagle Nebula; scientific visualization; WebGL.

1. Pendahuluan dan rancangan eksperimen

Perjalanan dengan percepatan proper konstan adalah contoh klasik bagaimana relativitas khusus mengubah jarak galaksi menjadi durasi seukuran manusia: rapiditas tumbuh secara linear terhadap waktu proper, dan jarak yang ditempuh tumbuh secara eksponensial terhadapnya [1, 2]. Yang jarang terlihat adalah *rupa* perjalanan semacam itu — bagaimana langit memampat ke depan, bagaimana warna berubah, bagaimana latar gelombang mikro kosmik (CMB) menjadi titik fokus yang terlihat, bagaimana citra Bumi membeku di belakang kapal — yang disajikan tanpa jalan pintas, dengan angka yang benar, sepanjang durasi nyata perjalanan.

Borealis Horizon adalah eksperimen tersebut. Kapal berangkat dari sebuah pangkalan pesisir fiktif, naik dengan daya dorong 1,1 g, beralih ke percepatan proper konstan 1 g, membalik arah daya dorong di tengah perjalanan, lalu berhenti, dalam keadaan diam relatif terhadap Bumi, 7 tahun cahaya sebelum bidang Pilar Penciptaan, setelah menempuh 6.985 tahun cahaya. Simulasi berjalan di peramban biasa (HTML, JavaScript, dan WebGL2, tanpa pustaka eksternal), dan saat keberangkatan, $T_0 = 19/10/2026\ 12:00:00$ UTC-3, telah dicap pada saat publikasi: semua pengunjung melihat kapal yang sama, di titik yang sama, dalam waktu nyata. Tidak ada percepatan waktu, jeda, atau putar balik; perjalanan berlangsung selama 17,21 tahun waktu kapal dalam durasi nyata situs.

Rancangan ini mengikuti tiga prinsip. (i) *Kesetiaan di mana ada perhitungan*: kinematika, jam, cahaya, dan latar kosmik dihitung dari hukum fisika, tanpa efek panggung. (ii) *Eksposur tetap*: penguatan (gain) dan fungsi kompresi nada jendela ditetapkan sebelumnya, tanpa penyesuaian eksposur otomatis menurut adegan. (iii) *Penyederhanaan yang dinyatakan*: apa yang belum dapat dilakukan oleh rekayasa (mesin, perisai) dan apa yang tidak terkandung dalam data (dimensi ketiga nebula) diakui secara eksplisit dan dicantumkan untuk publik di halaman "Lisensi puitis" situs. Artikel ini adalah padanan teknis dari daftar tersebut: artikel ini menjelaskan model, rumus, implementasi, dan masalah yang diketahui.

Bagian 2 menyajikan model gerak; Bagian 3, waktu dan sinyal; Bagian 4, cahaya (aberasi, Doppler, ekstingsi, katalog, eksposur, Bumi); Bagian 5, latar kosmik; Bagian 6, rekonstruksi Nebula Elang; Bagian 7, propulsi, energi, dan fluks pada perisai; Bagian 8, pertemuan bertata panggung; Bagian 9, instrumen, jurnal kapal, dan radio kapal; Bagian 10, implementasi dan ketangguhan numerik; Bagian 11, batasan dan masalah yang diketahui. Lampiran memuat konstanta, parameter, dan tonggak.

2. Model gerak

2.1 Fase naik ($\tau < 24$ jam)

Lintasan adalah fungsi murni dari waktu kapal τ (detik sejak keberangkatan), yang didefinisikan dalam dua fase. Pada fase pertama, dengan durasi tetap satu hari waktu kapal, kapal naik secara radial dari permukaan Bumi di bawah gravitasi Bumi dan daya dorong per satuan massa

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

dengan $GM = g_0 R_\oplus^2$ ($g_0 = 9,80665\text{ m/s}^2$, $R_\oplus = 6.371\text{ km}$), sehingga daya dorong bernilai 1,1 g di landasan dan menjadi g_0 ketika $1,1\text{ GM}/r^2$ turun di bawah g_0 , pada ketinggian 311 km ($r = R_\oplus\sqrt{1,1}$). Percepatan resultan adalah $a(r) - GM/r^2$: 0,1 g bersih pada awalnya, bertambah hingga praktis 1 g seiring melemahnya gravitasi Bumi. Tidak ada atmosfer, hambatan udara, rotasi Bumi, Matahari, maupun Bulan pada fase ini (Bagian 11). Sistem

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

diintegrasikan dengan Runge–Kutta orde keempat dengan langkah variabel yang telah ditentukan $h = 0,02 + 5 \times 10^{-4} \tau$ (dari 20 ms di darat hingga 43 s pada akhir hari), sambil menyimpan tabel τ , r , v , dan percepatan. Karena $v \ll c$ sepanjang hari itu (827 km/s pada akhirnya), fase ini diperlakukan sebagai newtonian; koreksi relativistik masuk melalui dua integral yang diakumulasikan bersama keadaan: *pembakaran* b (rapiditas yang diakumulasikan oleh daya dorong, Bagian 7),

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

yang diintegrasikan dengan aturan Simpson pada setiap langkah, dan waktu Bumi $t_\oplus$, dengan dilatasi orde pertama dalam v^2/c^2 ,

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

yang dievaluasi dengan rata-rata v^2 di kedua ujung langkah. Pada akhir hari itu kapal berada 34,9 juta kilometer dari pusat Bumi, pada 827 km/s, dengan $t_\oplus - \tau = 0,107$ s. Di antara simpul tabel, keadaan diinterpolasi dengan polinomial Hermite kubik menggunakan turunan yang diketahui (v untuk r , a untuk v), yang menjaga kontinuitas r , v , dan percepatan yang dilaporkan.

2.2 Fase relativistik: gerak hiperbolik dalam bentuk tertutup

Mulai dari $\tau_1 = 86.400$ s, percepatan proper bernilai konstan, $a = g_0$, dan lintasannya adalah gerak hiperbolik Rindler [1, 3]. Dengan rapiditas η yang didefinisikan oleh $\beta = \tanh \eta$ dan $\gamma = \cosh \eta$, percepatan proper konstan memberikan

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

dengan $\eta_1 = \operatorname{artanh}(v_1/c) = 2,76 \times 10^{-3}$ sebagai rapiditas pada akhir fase naik. Posisi radial dan waktu Bumi menyusul, untuk $\tau_1 \leq \tau < \tau_F$,

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

yang merupakan identitas $\cosh \eta - \cosh \eta_1 = 2 \sinh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ dan $\sinh \eta - \sinh \eta_1 = 2 \cosh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ yang ditulis tanpa pengurangan dua bilangan yang hampir sama (Bagian 10). Pembalikan terjadi pada rapiditas η_F sedemikian rupa sehingga pengereman simetris, dari η_F ke nol, menempuh tepat sisa jarak hingga tujuan $D = 6.985$ tc:

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

yang diperoleh dengan menyamakan $r(\eta_F) + (c^2/a)(\cosh \eta_F - 1) = D$. Pada pengereman ($\tau_F \leq \tau < \tau_{\text{fim}}$) rapiditas menurun secara linear, $\eta = (\tau_{\text{fim}} - \tau) a/c$, dan jarak yang tersisa adalah

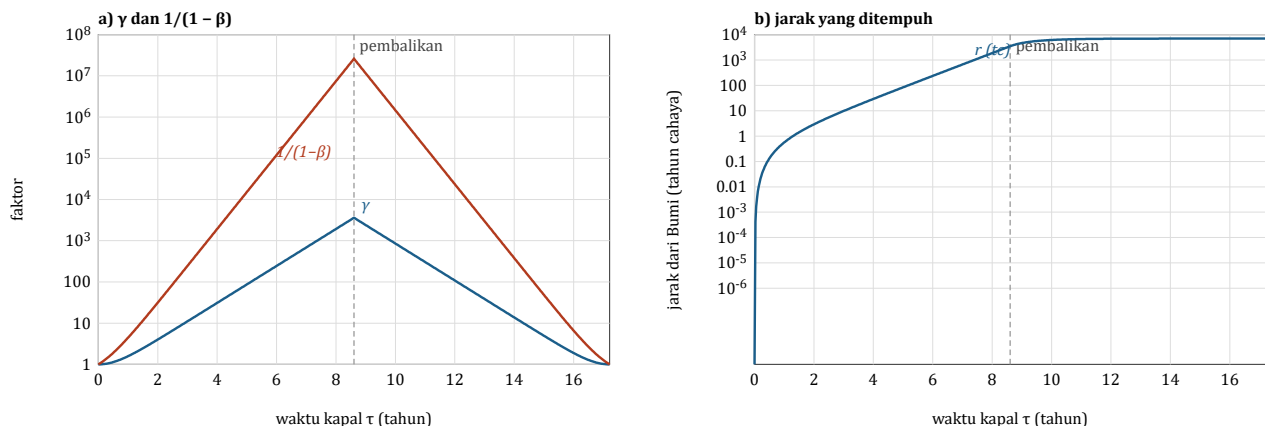
$$D - r = \frac{c^2}{a} \cdot 2 \sinh^2 \frac{\eta}{2}, \quad t_{\text{fim}} - t_\oplus = \frac{c}{a} \sinh \eta. \quad (8)$$

Tabel 1 merangkum nilai-nilainya. Skala $c/a = 0,9687$ tahun adalah konstanta alami perjalanan ini: setiap 0,9687 tahun waktu kapal menambahkan satu satuan pada rapiditas; setiap "9" tambahan pada fraksi

kecepatan cahaya memakan potongan pita yang sama panjangnya, seperti yang ditunjukkan pita rapiditas pada panel kecepatan.

Tabel 1. Nilai-nilai karakteristik lintasan ($a = g_0$, $D = 6.985$ tahun cahaya).

Besaran	Nilai	Keterangan
Akhir fase naik, τ_1	86.400 s	$r_1 = 3,49 \times 10^7$ km, $v_1 = 827$ km/s, $\eta_1 = 2,76 \times 10^{-3}$
Rapiditas pada pembalikan, η_F	8,8836	$\gamma_F = 3.606,3$; $1 - \beta_F = 3,84 \times 10^{-8}$ (kurang 41,5 km/jam dari c)
Pembalikan, τ_F	8,6057 tahun	$t_{\oplus} = 3.493,47$ tahun; $r_F = 3.492,5$ tc
Kedatangan, τ_{fim}	17,2114 tahun	6.286,5 hari waktu kapal; $t_{\oplus} = 6.986,94$ tahun
Kecepatan proper maksimum, $\gamma\beta c$	7,23 SA/s	jarak pada peta Galaksi per detik waktu kapal
Lintasan terkontraksi pada pembalikan, D/γ_F	1,94 tc	seluruh rute, diukur di kapal
Pembakaran total, b_{fim}	17,7672	rasio massa $e^b = 5,20 \times 10^7$ (Bagian 7)



Gambar 1. Kinematika perjalanan sebagai fungsi waktu kapal, menurut persamaan (5)–(8): (a) faktor Lorentz $\gamma = \cosh \eta$ dan $1/(1 - \beta) = (e^{2\eta} + 1)/2$ tumbuh secara eksponensial hingga pembalikan ($\gamma = 3.606$; $1 - \beta = 3,8 \times 10^{-8}$) dan menurun secara simetris selama pengereman; (b) jarak ke Bumi dalam tahun cahaya, dalam skala logaritmik — kapal melewati 1 tahun cahaya pada 1,29 tahun waktu kapal dan separuh perjalanan (3.492,5 tc) pada pembalikan.

2.3 Keadaan sesaat dan tonggak

Untuk sembarang τ , fungsi keadaan mengembalikan fase, τ , $t_{\oplus}$, r , v , η , β , γ , $\varepsilon = 1 - \beta$, percepatan yang dilaporkan, dan pembakaran. Tonggak yang didefinisikan oleh suatu jarak atau oleh suatu besaran fisis (lepas dari gravitasi Bumi, orbit planet, 1 hari cahaya, heliopause, awan Oort, Gelembung Lokal, ambang suhu CMB, jarak bintang acuan) diselesaikan dengan metode biseksi pada fungsi keadaan, dengan paling banyak 200 iterasi dan berhenti ketika titik tengah berimpit dengan salah satu ujung dalam presisi ganda; tonggak berdurasi tetap dan tonggak kalender dibangun secara langsung. Tonggak seperti "Jarak Proxima Centauri" berarti mencapai, dari Bumi, jarak bintang tersebut (4,25 tc) — bukan melewatinya. Keadaan yang sama memasok semua panel, jurnal kapal, radio, dan langit: tidak ada sumber kebenaran kedua.

3. Waktu dan sinyal

3.1 Jam

Jam kapal adalah jam nyata pengunjung, yang diselaraskan dengan jam server melalui header Date dari sebuah permintaan HEAD — sebuah perkiraan penyelarasan, bukan jaminan: header tersebut memiliki resolusi 1 s, jaringan bisa asimetris, dan jika permintaan gagal, yang berlaku adalah jam lokal — dan $\tau = t_{\text{kini}} - T_0$. Panel "Bumi lebih maju" menampilkan $t_{\oplus} - \tau$ dengan satuan dinamis. Pada awalnya selisih ini tumbuh sebagai $a^2\tau^3/(6c^2)$, menurut (4): 1,8 attodetik pada detik pertama, 1 pikodetik baru tercapai pada 82 s — di bawah resolusi integrasi presisi ganda pada detik-detik pertama, yang menjadi alasan batas bawah dalam pikodetik pada panel; pada kedatangan keunggulannya mencapai 6.970 tahun. Kecepatan proper, $\gamma\beta c$, ditampilkan pada panel kecepatan: pada pembalikan kapal maju 7,23 SA peta Galaksi per detik waktu kapal. Panel navigasi menampilkan sisa jarak yang diukur di kapal (jarak dalam kerangka acuan Bumi dibagi γ) dan seberapa jauh kontraksi telah memperpendek jalur; jika dibagi γ_F , seluruh rute akan sepanjang 1,94 tahun cahaya.

3.2 Kerangka acuan jam

Tiga waktu muncul pada instrumen dan sebaiknya tidak dikacaukan. τ adalah waktu proper kapal — jam kapal. $t_{\oplus}$ adalah waktu koordinat kerangka inersial tempat Bumi diam, "waktu Bumi" dalam model; $t_{\oplus} - \tau$ adalah keunggulan yang terakumulasi dari jam tersebut atas jam kapal, tetapi bukan sesuatu yang dapat ditampilkan kamera belakang: citra yang tiba dipancarkan pada $t_{\oplus} - x/c$, jauh sebelumnya (Bagian 3.3), dan simultanitas kerangka sesaat yang bergerak bersama kapal adalah konstruksi lain lagi, yang tidak digunakan pada panel. Demikian pula, $\gamma\beta c$ adalah jarak dalam kerangka acuan Bumi per detik proper kapal; secara lokal, tidak ada yang melampaui c . Relativitas umum berada di luar model: gravitasi Bumi masuk sebagai gaya newtonian pada fase naik, tetapi tidak ada koreksi gravitasional pada jam. Skala dari apa yang diabaikan tidak dapat diremehkan dibandingkan presisi yang ditampilkan: potensial permukaan Bumi ($\Delta\Phi/c^2 \approx 7 \times 10^{-10}$) mengakumulasi ~ 150 s dalam 6.987 tahun, dan potensial Matahari pada 1 SA ($\approx 10^{-8}$), ~ 36 menit — "waktu Bumi" hingga ketelitian detik bergantung pada kerangka acuan dan potensial yang dipilih [22].

3.3 Tunda sinyal dan horizon percepatan

Hubungan dengan Bumi diperlakukan dengan Bumi diam di titik keberangkatan dan cahaya merambat dalam garis lurus (orbit Bumi, sebesar 8 menit cahaya, diabaikan dibandingkan 6.985 tahun cahaya). Dengan $x = r - R_{\oplus}$, citra Bumi yang tiba di kapal pada keadaan $(t_{\oplus}, x)$ dipancarkan pada $t_{\oplus} - x/c$, dan sinyal yang dipancarkan kapal tiba di Bumi pada $t_{\oplus} + x/c$. Bagi yang berakselerasi sebesar g dari keadaan diam terdapat sebuah horizon: sinyal yang dipancarkan dari titik asal setelah $t_{\oplus} = c/a = 0,9687$ tahun tidak pernah mencapai kapal selama kapal berakselerasi [3]. Simulasi tidak memaksakan fakta ini; fakta ini muncul dari (6): pada pembalikan, cahaya yang tiba dari Bumi dipancarkan hanya 0,9686 tahun setelah keberangkatan dan berumur 3.492,5 tahun; pada kedatangan, cahaya itu dipancarkan 1,937 tahun setelah keberangkatan.

Citra Bumi, selain sudah tua, berjalan dalam gerak lambat dan memerah oleh faktor Doppler belakang

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

yang bernilai $1/7.213$ pada pembalikan: satu detik waktu kapal menampilkan $1/7.213$ detik waktu Bumi, dan cahaya tiba 7.213 kali lebih merah. Matahari di buritan adalah benda hitam 5.772 K yang terlihat pada

$T' = 5.772 e^{-\eta} = 0,80$ K pada pembalikan — lebih dingin daripada latar kosmik — dan sebuah stasiun FM pada 100 MHz akan tiba pada 13,9 kHz. Kamera belakang menampilkan tanggal pemancaran, umur cahaya, dan faktor gerak lambat, yang dihitung dengan ungkapan-ungkapan ini.

3.4 Kalender

Penghitung durasi menggunakan tahun 365,25 hari (31.557.600 s) dan bulan sebesar seperdua belas tahun; tanggal diperoleh dengan menambahkan τ atau $t_{\oplus}$ pada saat keberangkatan — yang ditetapkan dalam UTC (19/10/2026 15:00:00 UTC, disajikan sebagai 12:00 UTC-3) — dan diformat dalam zona waktu lokal pengunjung; kalender jurnal kapal menggunakan zona waktu Brasília. Tidak ada komunikasi nyata: panel menghitung tunda yang akan dialami sebuah sinyal; radio kapal adalah fiksi yang ditulis untuk perjalanan ini (Bagian 11).

4. Cahaya

4.1 Aberasi

Setiap sumber yang diam dalam kerangka acuan Galaksi terlihat oleh kapal pada arah yang teraberasi. Dengan θ sebagai sudut antara sumber dan arah gerak dalam kerangka acuan Galaksi dan θ' sebagai sudut yang teramati, hubungan eksaknya adalah

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

yaitu "rumus setengah sudut" [4]. Rumus ini lebih dipilih daripada bentuk lazim $\cos \theta' = (\cos \theta + \beta) / (1 + \beta \cos \theta)$ karena tetap stabil ketika $\beta \rightarrow 1$: $\tan(\theta/2)$ dihitung sebagai $\sin \theta / (1 + \cos \theta)$ untuk belahan depan dan $(1 - \cos \theta) / \sin \theta$ untuk belahan belakang, tanpa pembatalan, dan faktor $e^{-\eta}$ memampatkan belahan depan ($\theta < 90^\circ$) ke dalam kerucut berjari-jari sudut $2 \cdot \arctan(e^{-\eta}) \approx 2e^{-\eta}$ di sekitar haluan; arah tepat ke belakang tetap berada di belakang. Pada pembalikan belahan depan muat dalam lingkaran berjari-jari $0,016^\circ$ — yang oleh panel aberasi disebut "separuh langit dalam lingkaran θ' ". Rumus yang sama, dalam bentuk terbalik, digunakan untuk nebula, Bima Sakti difus, dan Bumi: sinar diintegrasikan dalam kerangka diam dan radians ditransformasikan pada akhirnya.

4.2 Doppler: warna dan kecerahan

Faktor Doppler sebuah sumber yang terlihat pada arah θ' adalah $D = 1 / [\gamma(1 - \beta \cos \theta')]$. Untuk $\gamma \sim 10^3$ ungkapan $1 - \beta \cos \theta'$ kehilangan digit di dekat haluan — secara terukur dalam presisi ganda dan parah dalam float32 shader, yang epsilon mesinnya (6×10^{-8}) melampaui $1 - \beta$ pada pembalikan; implementasi menggunakan bentuk yang setara

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

dengan ε diperoleh langsung dari rapiditas, tanpa mengurangi β dari 1 (Bagian 10). Sebuah bintang yang diperlakukan sebagai benda hitam bersuhu T tampak sebagai benda hitam bersuhu $T' = D \cdot T$; sebuah garis emisi dengan panjang gelombang λ tampak pada $\lambda' = \lambda / D$; fluks sumber titik berskala dengan D^2 dan radians sumber luas dengan D^4 [5]. Untuk bintang-bintang katalog HYG, yang memiliki kecepatan sendiri, Doppler bintang terhadap kerangka acuan Galaksi disertakan dalam logaritma yang sama. Dari ketiga aturan ini, yang diterapkan pada setiap bintang, muncullah busur bintang: di depan, bintang-bintang dingin (3.000–4.000 K) yang tergeser oleh $D \sim 2$ –3 menjadi putih dan biru, bintang-bintang panas lenyap ke ultraungu, dan langit di belakang meredup dan memerah.

4.3 Spektrum, warna, dan katalog

Spektrum bintang adalah benda hitam. Konversi suhu ke warna menggunakan fungsi pencocokan warna CIE 1931 dalam pendekatan analitis Wyman, Sloan, dan Shirley [6], yang diintegrasikan secara numerik dengan hukum Planck antara 360 dan 830 nm, serta matriks XYZ→sRGB linear; hasilnya adalah fraksi daya bolometrik yang jatuh pada setiap kanal, ditabulasikan pada 1.024 suhu dari $\log_{10}T = 0,5$ hingga 9,5 dan dicuplik di shader dengan interpolasi (tanpa undakan warna). Radians sebuah bintang dengan luminositas visual L_V pada jarak d adalah L_V/d^2 dalam satuan $L_\odot/(4\pi \text{ tc}^2)$, dengan suhu HYG diperkirakan dari warna B-V (Ballesteros 2012 [7]; B-V = 0,65 bila tidak tersedia) dan suhu adendum Gaia dari kelas spektral.

Katalog berisi 299.858 bintang: 109.400 bintang HYG v4.1 [8], dengan posisi, kecepatan, dan epoch J2000, serta 190.458 bintang yang dipilih dari distribusi Gaia EDR3/Hipparcos/Tycho yang disiapkan untuk Celestia [9] ($V < 9$ di sepanjang rute, $V < 9$ di Bumi, atau $V < 13$ dalam radius 15° dari tujuan), dideduplikasi berdasarkan HIP/HD. Posisinya tiga dimensi, sehingga paralaks di sepanjang rute bersifat geometris, bukan rekayasa panggung. Untuk HYG, posisi yang ditampilkan adalah posisi terhambat (retarded): dengan iterasi titik tetap, dicari saat pemancaran t_e sedemikian rupa sehingga cahaya yang dipancarkan di $p + v \cdot (t_e - \text{epoch})$ tiba pada pengamat pada tahun berjalan, dengan menambatkan solusi pada posisi yang teramati pada epoch katalog. Tidak ada kelipan, cahaya zodiak, maupun lensa gravitasi.

4.4 Ekstingsi antarbintang

Debu adalah sebuah cakram aksisimetris eksplisit, dengan kedalaman optis yang diintegrasikan antara pengamat dan sumber,

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

dengan Matahari pada 65 tc dari bidang; K setara dengan 0,55 magnitudo per seribu tahun cahaya di bidang. Integral ini memiliki bentuk tertutup di sepanjang segmen lurus (lampiran A). Ekstingsi diterapkan secara *diferensial*: magnitudo katalog sudah mencakup ekstingsi hingga Bumi, sehingga kedalaman optis Bumi-bintang dikurangkan dan kedalaman optis kapal-bintang ditambahkan, agar sebuah bintang mempertahankan kecerahan terukurnya selama kapal masih dekat Bumi. Ketergantungan spektral menggunakan faktor $\exp(-\{-0,18; 0; 0,30\} \cdot \tau)$ pada kanal R, G, dan B. Kecerahan difus Bima Sakti adalah model cakram dengan kerapatan $0,055 \cdot e^{-R/8500} \cdot e^{-|z|/700}$ (tahun cahaya), spektrum 5.000 K, dan pusat galaksi pada 26.670 tc, diintegrasikan dalam 28 langkah logaritmik hingga 72.000 tc, dengan debu yang sama; Awan Magellan, M31, dan M33 adalah awan partikel dengan bentuk perkiraan. Kueri ke peta tiga dimensi Bayestar tidak mendapat respons selama persiapan, sehingga tidak ada awan debu nyata yang direpresentasikan (Bagian 11).

4.5 Eksposur tetap, PSF, dan konversi ke layar

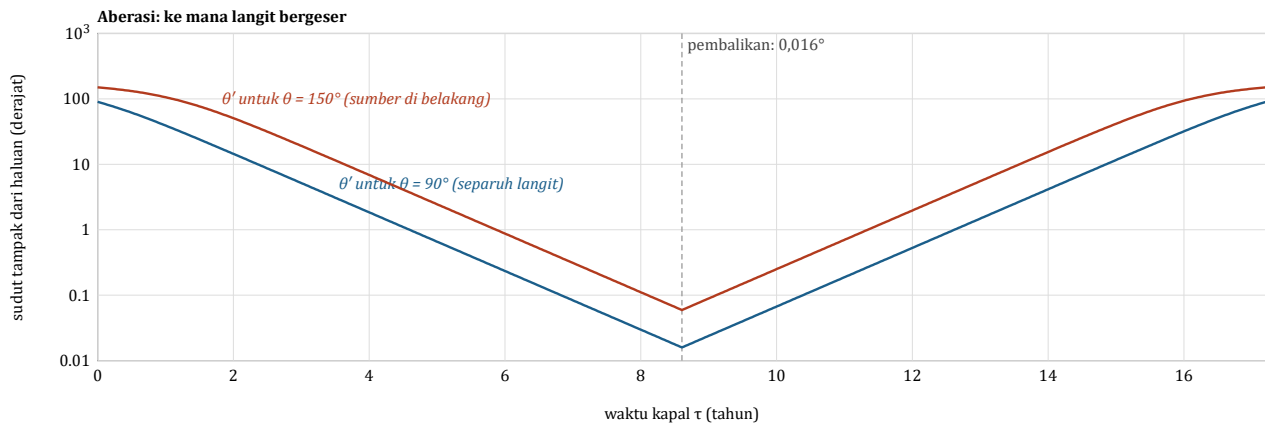
Perender bersifat HDR: fluks setiap bintang diakumulasikan dalam *buffer* presisi setengah, dalam satuan fisis, dengan penguatan tetap E yang dipilih satu kali ($E_{\text{gelap}} = 5.400$ pada kalibrasi acuan 1.200 px/rad, diskalakan dengan $(\text{px/rad})^2$ agar kecerahan tidak bergantung pada resolusi). Bintang yang tidak terpisahkan digambar sebagai gaussian kompak, $\sigma = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{px/rad})$, tanpa cakram bercahaya buatan; cakram fisis hanya muncul ketika jari-jari sudut teraberasi melebihi 1,2 px. Konversi ke layar adalah kompresi SDR tetap, bukan mata yang disimulasikan maupun eksposur otomatis:

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

dengan c warna linear, L luminansinya, dan $s(L)$ transisi halus antara 1,5 dan 12 yang beralih dari mempertahankan rona ke saturasi per kanal. Dengan kalibrasi ini, dalam keadaan diam setiap bintang hingga magnitudo 7 tampak dan batas perenderan berada di kisaran magnitudo 8 — kriterianya adalah satu piksel di atas ambang kecerahan tetap di layar, yang diverifikasi oleh replika CPU dari shader terhadap katalog (Bagian 10). Dengan mengambil magnitudo 8,0 sebagai acuan perkiraan dan 6,5 sebagai acuan pengamatan mata telanjang di langit gelap, selisihnya sesuai dengan sumber yang fluksnya sekitar empat kali lebih kecil ($10^{0,4 \cdot 1,5} \approx 4$). Perbandingan ini mencirikan eksposur yang dipilih; ini bukan kalibrasi penglihatan manusia. Jumlah-jumlah tersebut — sekitar 56.000 bintang dirender di seluruh langit, dibandingkan ~9.000 yang terlihat dengan mata telanjang — mengacu pada seluruh langit dan tidak mengukur kepekaan. Kamera belakang menggunakan penguatan yang sama.

4.6 Bumi, atmosfer, dan pangkalan peluncuran

Bumi digambar sebagai bola bertekstur dengan komposit Blue Marble: Next Generation Januari 2004 (2.048×1.024) [20] dan tutupan awan Blue Marble Clouds, yang terakhir ini dengan detail prosedural kontinu dalam dua lapisan bola (ketinggian 1,5–3,8 km dan 8,5–9,3 km) agar pendekatan kamera tidak menampilkan piksel. Permukaan menerima cahaya Matahari dengan terminator pada saat keberangkatan dan halo atmosfer dengan hamburan tunggal; langit siang yang terlihat dari pangkalan menggelap antara ketinggian 50 dan 100 km, sebagai pilihan visual, dengan tetap mempertahankan tepi (limb) yang terang. Pangkalan adalah dekor: lintang sama dengan deklinasi M16 ($-13,88^\circ$, ditentukan oleh sumbu rute), bujur visual tetap pada $-39,02^\circ$, kamera pada 35 m, menara 112 m, garis pantai dan sungai prosedural; detail pangkalan lenyap pada 12 km dan keseluruhannya pada 90 km. Orientasi Bumi yang ditampilkan tidak berotasi (Bagian 11). Ketika Bumi menyusut hingga jari-jari tampak kurang dari 1,2 px, ia berubah menjadi titik, benda hitam 5.772 K dengan luminositas $1,36 \times 10^{-10} L_\odot$ dan rona kebiruan, dan bintang yang berada di belakang cakram ditutupi oleh Bumi adegan.



Gambar 2. Sudut tampak, diukur dari haluan, dari sumber yang dalam kerangka acuan Galaksi berada pada 90° (batas separuh langit) dan dari sumber pada 150° , hampir di belakang kapal, menurut persamaan (10): $\tan(\theta'/2) = e^{-\eta} \tan(\theta/2)$. Setelah 1 tahun waktu kapal separuh langit sudah muat dalam 39° ; setelah 3 tahun, dalam 7° ; pada pembalikan, dalam $0,016^\circ$ — dan sumber di belakang tampak $0,06^\circ$ dari haluan.

5. Latar gelombang mikro kosmik

CMB adalah benda hitam pada $T_0 = 2,7255$ K [10] dalam kerangka acuan tempat ia isotropik. Bagi pengamat yang bergerak, setiap arah tetap menampilkan spektrum benda hitam, dengan suhu

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

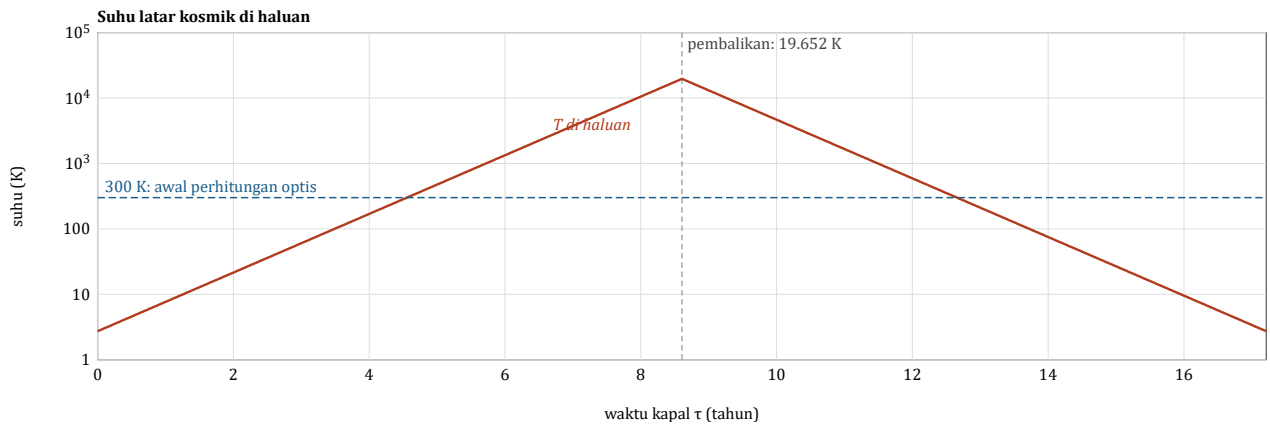
dengan θ diukur dari arah gerak [11]. Kapal berangkat dari Tata Surya, yang sudah bergerak pada 369,82 km/s ke arah $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$ relatif terhadap CMB [10]; boost kapal dikomposisikan dengan dipol ini: sumbu dan rapiditas efektif kerangka CMB sebagaimana dilihat dari kapal diperoleh dengan mengomposisikan kedua kecepatan, dengan cermat menghitung $\gamma - |\gamma\beta|$ sebagai $e^{-\eta}$ untuk menghindari pembatalan. Suhu pada arah d kemudian adalah $T_0/(e^{-\eta_{ef}} + \frac{1}{2}|\gamma\beta|_{ef}|d - \text{sumbu}|^2)$, dengan $|d - \text{sumbu}|^2 = 2(1 - \cos \theta)$ yang stabil di apeks. Di haluan, pada pembalikan, $T = 19.652$ K.

Radians setiap arah adalah hukum Planck yang diintegrasikan pada rentang tampak dengan fungsi CIE, ditabulasikan pada 2.048 suhu dari 300 hingga 50.000 K dalam skala logaritmik. Bercak optis diintegrasikan pada luas setiap piksel dengan kuadratur Gauss 4 titik dan subdivisi adaptif (hingga enam tingkat) dari intinya, yang lebar sudutnya $\sim 2e^{-\eta}$ rad dibandingkan dengan piksel secara independen dari resolusi; dengan demikian apeks yang lebih kecil dari satu piksel mempertahankan energinya saat melintasi batas antarpiksel atau ketika resolusi berubah. Di bawah puncak 300 K, ekor tampaknya kurang dari $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ dan bercak tidak dihitung. Hasilnya dijumlahkan dalam titik mengambang 32 bit sebelum kompresi (13) dan *tidak* dilemahkan oleh debu Pilar, yang transparan dalam gelombang mikro dalam kerangka acuan debu.

Iradians pada pelat yang menghadap haluan, $\int \sigma T(\theta)^4 / \pi \cos \theta d\Omega$ pada belahan depan, ditabulasikan dalam η dengan langkah logaritmik dalam θ (kerucut panas memiliki lebar $\sim 1/\gamma$): nilainya $\sigma T_0^4 = 3,1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ dalam keadaan diam dan cenderung ke $(16/3)\gamma^2 \sigma T_0^4$, komponen T^{0x} dari radiasi yang ditransformasikan; pada pembalikan nilainya 217 W/m^2 , dan kedua limit diverifikasi dalam uji. Tabel 2 memberikan tonggak suhu; iradians yang sama, yang dikonversi dengan fraksi tampak benda hitam, menerangi kabin (5,4% cahaya Matahari tampak pada pembalikan).

Tabel 2. Suhu latar kosmik di haluan sepanjang perjalanan.

Suhu di haluan	Pelintasan pertama (tahun waktu kapal)	Waktu total di atas nilai (tahun)
300 K (awal perhitungan optis)	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 (puncak, pembalikan)	8,61	—



Gambar 3. Suhu benda hitam latar kosmik ke arah haluan, $T = T_0 e^{\eta}$ (dikoreksi oleh dipol Matahari), menurut persamaan (14): naik dengan faktor e setiap 0,97 tahun waktu kapal, melewati 300 K pada 4,55 tahun — ketika bercak optis mulai dihitung — dan mencapai 19.652 K pada pembalikan, lalu turun secara simetris selama pengereman.

6. Nebula Elang: data dan rekonstruksi

6.1 Data

Geometri pada bidang langit berasal dari dua foto publik [12, 13]: ESO0926a (medan lebar 32', filter B, V, dan R, CC BY 4.0) menyediakan struktur medan lebar; Hubble heic1501a (Pilar, CC BY 4.0), yang diregistrasi dengan korelasi terhadap foto pertama (rotasi 35°), mengisi struktur yang lebih kecil dari 0,08 tc. Arah bintang-bintang NGC 6611 berasal dari SIMBAD dan diperiksa, dalam detik busur, terhadap WCS citra ESO; suhu (32.000–41.500 K) dan luminositas delapan sistem berasal dari Tabel 5 Sana et al. [14], dengan biner yang tidak terpisahkan diperlakukan sebagai satu sumber. Rasio lima belas garis optis relatif terhadap H β (H α /H β = 4,343) berasal dari spektrum contoh McLeod et al. [15], yang diperoleh dengan MUSE, dan emisivitas H α menggunakan koefisien rekombinasi $3,56 \times 10^{-25}$ erg cm³ s⁻¹, yang diperiksa melalui hubungan antara ukuran emisi dan kecerahan Rayleigh. Kedalaman berasal dari jaring acuan untuk cetak 3D (NASA/STScI), diskalakan dengan 1,725 agar berimpit dengan siluet yang diregistrasi: tinggi Pilar 8,625 tc, kotak 6,39 × 10,53 × 9,81 tc, kisi 142 × 234 × 218 sel. Semua dimensi transversal adalah sudut terukur dikalikan jarak yang diadopsi, 7.000 tc ke pusat M16 dan 6.992 tc ke bidang Pilar; kedalamannya diasumsikan (Bagian 6.2).

6.2 Model transfer

Penajaman untuk keperluan publikasi pada foto-foto dibatalkan dengan hukum pangkat berpangkat 2,4 (hipotesis) dan citra yang dihasilkan diuraikan menjadi selubung emisi (maksimum halus pada 0,7 tc) dan kedalaman optis fotografis hingga $\tau_f = 4,5$, yang dikonversi menjadi kedalaman optis yang diadopsi model melalui $\tau_v = \min[8, \tau_f(1 + 2,6 \tau_f)]$ — sebuah aturan yang dinyatakan, bukan pengukuran independen. Lapisan-lapisannya adalah lembaran dengan ketebalan: emisi rekombinasi dalam lembaran yang berpusat 15 tc di belakang bidang Pilar ($\sigma = 3$ tc, batas bawah 2%), pita-pita dan awan induk pada 8,5 tc ($\sigma = 2$ tc), bintang-bintang gugus pada satu bidang bersama 3,2 tc di belakang bidang Pilar. Cahaya yang terlihat di atas sebuah penyerap diperlakukan sebagai tabir yang dipancarkan dalam lapisan 0,1 hingga 1,4 tc di depannya, dengan spektrum latar. Hamburan cahaya bintang menggunakan albedo 0,5 dan fungsi fase Henyey–Greenstein dengan $g = 0,6$; opasitas $\kappa = 6$ tc⁻¹; kontinum yang terhambur adalah benda hitam 37.755 K. Kecerahan absolut ditetapkan oleh satu ukuran emisi, 10^5 cm⁻⁶·tc (≈ 100 e⁻/cm³ dalam 10 tc), nilai yang masuk akal di sisi tinggi.

Transfer berupa ray marching dalam kerangka diam nebula, dengan 224 sampel (24 di depan, 160 pada interval halus pita-pita dan Pilar, 40 di belakang): emisi garis, kontinum terhambur, dan serapan kelabu diintegrasikan secara berurutan di sepanjang sinar; radians ditransformasikan oleh Doppler dan aberasi pada akhirnya (garis-garis yang tergeser oleh λ/D keluar dari rentang tampak saat mendekat — H α , 656 nm, berada pada 234 nm pada 77% c); pass ini menyimpan, selain radians pra-perkalian, kedalaman keluar (dikodekan sebagai $\log_2(1 + d)/34$, sama dengan pass bintang) dan kedalaman optis kumulatif pada empat titik, sehingga bintang-bintang di belakang materi dilemahkan oleh apa yang benar-benar berada di depannya. Tingkat detail tekstur dipilih menurut sudut diam per piksel tampak, yang bertambah dengan faktor Doppler: nebula tidak pernah memperoleh detail sudut melebihi yang dimiliki bidang fotografis, dan tidak bergerigi ketika jauh. Distribusi volumetrik yang diadopsi tidak ditentukan secara unik oleh pengamatan: spektroskopi memberikan batasan pada kecepatan, kerapatan elektron, ekstingsi, dan geometri relatif Pilar [15], tetapi tidak menetapkan medan tiga dimensi lengkap kerapatan dan emisivitas yang digunakan di sini; posisi dan ketebalan lapisan, bidang bersama bintang-bintang, dan kedalaman yang diberikan pada jaring adalah hipotesis model yang terdokumentasi. Bagian 11 merangkum apa saja dalam model ini yang merupakan hipotesis.

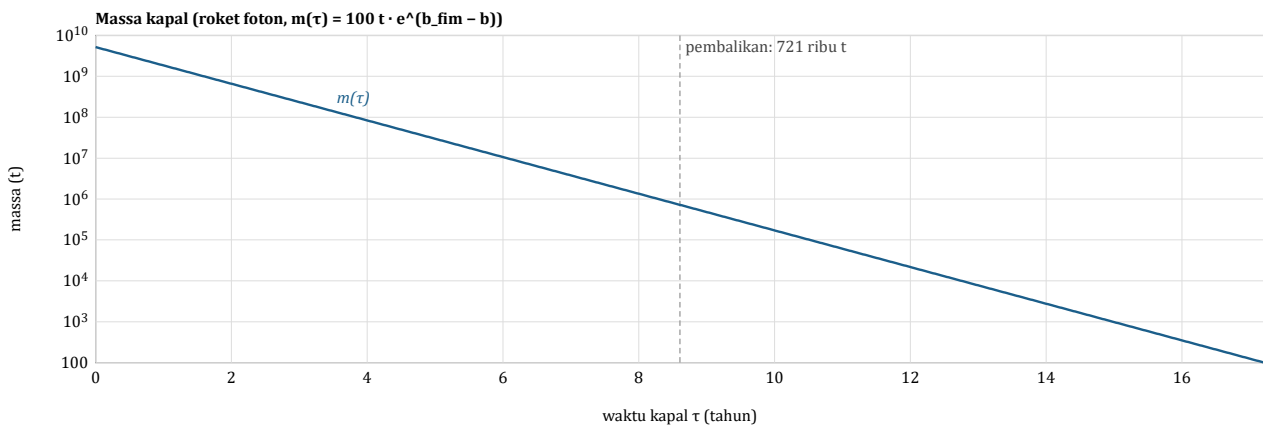
7. Propulsi, energi, dan fluks pada perisai

7.1 Roket foton

Diadopsi sebuah roket foton sempurna: seluruh massa bahan bakar diubah menjadi radiasi terkolimasi ke arah yang berlawanan dengan daya dorong. Untuk pendorong ini, persamaan roket relativistik memberikan $m(\tau) = m_{\text{fim}} e^{b_{\text{fim}} - b(\tau)}$, dengan b rapiditas yang diakumulasi oleh daya dorong, (3): $b = b_1 + \eta - \eta_1$ pada percepatan dan $b = b_F + \eta_F - \eta$ pada pengereman, dengan $b_F = b_1 + \eta_F - \eta_1$ dan $b_1 = 2,83 \times 10^{-3}$ sebagai pembakaran fase naik. Dengan massa kering $m_{\text{fim}} = 100$ t:

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

yaitu yang dipancarkan Matahari dalam 1.221 s. Daya berkas, dalam kerangka sesaat kapal, adalah $P = m \cdot a_{\text{dorong}} \cdot c$. Pada awal lepas landas, dengan daya dorong 1,1 g, nilainya sekitar $1,68 \times 10^{22}$ W; sebagai perbandingan, acuan $P_{\text{ref}} = m g_0 c$ yang diadopsi dalam model bernilai $1,53 \times 10^{22}$ W dengan massa awal. Selama pengereman pada 1 g, daya turun dari $2,1 \times 10^{18}$ W pada pembalikan menjadi $2,9 \times 10^{14}$ W tepat sebelum berhenti, ketika mesin dimatikan; pada pengereman, berkas mengarah ke depan relatif terhadap gerak. Fraksi bahan bakar yang terpakai adalah $(1 - e^{-b}) / (1 - e^{-b_{\text{fim}}})$ dan cadangan menjadi nol tepat saat berhenti; panel sistem menampilkan cadangan, dan pemformatan yang digunakan radio kapal menghitungnya secara langsung, $e^{-b}(1 - e^{b - b_{\text{fim}}}) / (1 - e^{-b_{\text{fim}}})$, agar digit-digit terakhir tidak hilang karena pembatalan, dengan menyusun kedua persentase dalam aritmetika desimal bilangan bulat (jumlahnya genap 100% tanpa membulatkan cadangan menjadi nol sebelum akhir). Berkas terkolimasi tidak terlihat dari samping dalam ruang hampa tanpa suatu mekanisme hamburan; dalam medium antarbintang, rupanya akan bergantung pada spektrum berkas serta sifat dan distribusi gas dan debu. Hamburan ini tidak dihitung oleh simulator; karena itu kontribusi visualnya dihilangkan — tidak ada semburan maupun kilatan — dan pengereman ditunjukkan oleh instrumen.



Gambar 4. Massa total kapal sepanjang perjalanan untuk roket foton ideal dengan massa kering 100 t: $5,20 \times 10^9$ t saat keberangkatan, $7,21 \times 10^5$ t pada pembalikan, dan 100 t di titik berhenti; dalam skala logaritmik kurvanya berupa garis lurus pada setiap ruas, karena pembakaran b adalah rapiditas terakumulasi itu sendiri.

7.2 Medium antarbintang dan perisai

Gas antarbintang tiba di haluan sebagai berkas proton dengan energi kinetik $(\gamma - 1)m_p c^2$, dengan kerapatan γn dalam kerangka kapal. Fluks energi pada permukaan yang tegak lurus terhadap gerak adalah

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

yang ditulis dalam bentuk kedua untuk menghindari $\gamma - 1$ pada kecepatan rendah. Dengan $n = 0,1 \text{ cm}^{-3}$, kerapatan Gelembung Lokal yang diadopsi untuk seluruh perjalanan, $W = 5,9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ pada

pembalikan (3,4 TeV per proton), sekitar 930 kali emitansi permukaan Matahari; suhu kesetimbangan radiatif satu sisi, $(W/\sigma)^{1/4}$, adalah ~ 32.000 K. Blok PERISAI pada panel sistem menampilkan besaran-besaran ini dan mengandaikan perisai yang mampu menahannya. Semyonov [16, 17] menunjukkan bahwa gas yang diterima adalah sumber radiasi dominan pada penerbangan relativistik, melebihi sinar kosmik, dan menuntut pelindung yang nyata; simulasi tidak memodelkan dosis, erosi oleh debu, maupun radiasi sekunder (Bagian 11).

8. Pertemuan bertata panggung

8.1 Posisi dan kecepatan

Pada garis lurus dari Bumi ke M16, kapal tidak akan lewat dekat benda Tata Surya mana pun. Agar perjalanan memiliki sesuatu untuk ditampilkan pada hari-hari pertama, Bulan, Mars, Ceres, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus, dan Pluto ditempatkan pada titik ketika kapal melintasi jari-jari orbit rata-rata masing-masing, pada sisi rute yang berselang-seling, pada 1,5 jari-jari dari pusat (Saturnus pada 1,55 R dan 0,18 R di atas bidang cincin; Uranus pada 1,5 R, melalui celah antara pita pertama dan kedua, dengan kelonggaran lebih dari 300 km); bulan-bulan Jupiter memiliki jari-jari nyata (1.821, 1.560, dan 2.634 km) pada posisi tetap, Charon (606 km) berada pada (9.000; 5.000; 12.000) km dari Pluto — 15.800 km, sekitar 20% kurang dari jarak pisah nyata ~ 19.600 km — dan sabuk asteroid direpresentasikan oleh dua puluh batuan berukuran 20–92 km. Saat setiap lintas dekat adalah tonggak fisis jari-jari orbit (Lampiran B), dan kecepatannya adalah kecepatan lintasan: perpindahan per bingkai adalah $\gamma\beta c\Delta\tau$ — Bulan melintasi diameternya dalam 41 s pada 307 ribu km/jam; Pluto lewat pada 38,7 juta km/jam, dalam 0,22 s. Tidak ada gerak lambat, bantuan gravitasi, maupun gangguan pada rute.

8.2 Representasi

Benda-benda tersebut adalah bola bertekstur (Solar System Scope, CC BY 4.0, dengan isian untuk wilayah yang tidak teramati; Pluto dari New Horizons dengan celah; Ceres fiktif) yang diterangi dari arah tetap, $\text{normalize}(-0,48; 0,65; -0,90)$, dan bukan oleh Matahari — fase yang ditampilkan bukan fase nyata. Aberasi diterapkan pada posisi dan ukuran sudut setiap benda, tetapi tidak ada pergeseran Doppler warna maupun penguatan D^4 pada tekstur: pada lintas dekat planet $\beta \leq 0,036$, yang menghilangkan hingga 3,7% pergeseran spektral dan hingga 15,5% penguatan radians (D^4) untuk benda di depan; di awan Oort $\beta = 0,25$ dan faktor $D \approx 1,3$ sudah hampir melipatgandakan radians. Cincin Saturnus adalah materi sintesis dengan pita C (1,275–1,58 R_S), B (1,58–2,018), celah Cassini (2,018–2,10), A (2,10–2,349), dan Encke (2,291–2,297), dengan $R_S = 58.232$ km dalam adegan: dalam kilometer, tepi-tepinya berada pada 74.246 (C bagian dalam; NASA 74.658), 92.007 (C/B; 91.975), 117.512 (B bagian luar; 117.507), 122.287 (A bagian dalam; 122.340), dan 136.787 km (A bagian luar; 136.780) — selisih hingga 0,55%; yang sintesis adalah teksturnya. Cincin Uranus adalah tujuh pita bertata panggung yang berpusat dari 1,62 hingga 2,07 R_U dengan langkah 0,075 R_U , dengan lebar 400 hingga 1.500 km, diperbesar agar terlihat: cincin nyata selebar 1 hingga 10 km (cincin ϵ , 20 hingga 100 km). Cincin-cincin ini memiliki transparansi dan bayangan, tanpa emisi sendiri.

8.3 Awan Oort dan Gelembung Lokal

Mulai dari 2.000 SA dari Matahari (hari 90,2 waktu kapal, $\beta = 0,25$), sebuah rentang 24 jam waktu kapal menampilkan sembilan kelompok berisi tiga benda es berukuran 35 hingga 125 km, bertekstur seperti Bulan, yang lewat hingga sedekat 4.500 km dari kapal antara pukul 00.00 dan 23.52 waktu kapal; akhir hari itu hanya menutup rangkaian tersebut — model menempatkan keluarnya kapal dari awan pada 100.000 SA, pada hari ke-574. Awan yang nyata disimpulkan, bukan diamati; benda-benda berukuran lebih

dari 1 km berjarak puluhan SA satu sama lain, dan peluang lewat dalam jarak 10 ribu kilometer dari salah satunya dalam 24 jam pada dasarnya nol. "Dinding" filamen Gelembung Lokal adalah transisi gaussian ($\sigma = 0,003 \text{ tc}$) pada 300 tc, yang digambar dalam koordinat layar dengan derau fraktal tanpa Doppler maupun aberasi; gelembung yang nyata adalah gas panas, tak terlihat dalam optis dan tanpa tepi yang tegas, dan pada 300 tc kapal sudah berada pada $\gamma \approx 310$. Tonggak heliosfer (kejut terminasi pada 90 SA, heliopause pada 120 SA, Voyager 1 pada 165 SA ditambah 3,57 SA/tahun sejak 2025, sabuk Kuiper pada 40 SA) adalah nilai yang dibulatkan, diukur sebagai jarak ke Matahari.

9. Instrumen, jurnal kapal, dan radio kapal

9.1 Panel

Semua panel adalah fungsi murni dari keadaan (Bagian 2.3), yang diformat dalam modul tanpa akses ke dokumen dan diuji di Node. Panel kecepatan menampilkan kecepatan dalam km/jam, fraksi c dengan sedikitnya dua digit signifikan dari selisihnya terhadap 100% (99,9999962% pada pembalikan), kecepatan proper $\gamma\beta c$ dalam satuan dinamis (km, ribu km, juta km, SA per detik waktu kapal), dan *pita rapiditas*: karena η bertambah dengan laju yang sama setiap hari waktu kapal, kapal maju di sepanjang pita dengan langkah konstan, dan tanda 50%, 90%, 99%, ... 99,99999% c , pada $\eta = \frac{1}{2} \ln((2 - \epsilon)/\epsilon)$, hampir berjarak sama. Panel waktu menampilkan keunggulan Bumi, $t_{\oplus} - \tau$, pada skala latar 1-2-5 dengan satuan dinamis mulai dari pikodetik (di bawah itu selisihnya berada di bawah resolusi integrasi pada detik-detik pertama) dan faktor γ dalam skala logaritmik; massa, juga dalam skala logaritmik, ada di panel "Massa dan bahan bakar", di samping cadangan. Peta navigasi memiliki siklus 64 s: 10 s pada tampilan umum, 2 s mendekat, 50 s pada tampilan lokal, dan 2 s kembali, dengan kapal terus bergerak di sepanjang mistar selama transisi. Tampilan umum memetakan posisi dengan $X = \frac{1}{2} \ln(1 + k u)/\ln(1 + k)$ sebelum pembalikan, dengan $u = (r - R_{\oplus})/(r_F - R_{\oplus})$ dan $k = 10^{12}$, dan dengan $X = 1 - \frac{1}{2} \ln(1 + k w)/\ln(1 + k)$ sesudahnya, dengan $w = (D - r)/(D - r_F)$ yang dievaluasi menurut (8): mistar beralih dari jarak yang telah ditempuh ke jarak yang tersisa pada pembalikan, dan baik kilometer-kilometer pertama maupun tahun-tahun cahaya terakhir tetap terlihat; Bumi dan Pluto adalah acuan tetap Tata Surya, dengan pertemuan berikutnya disorot. Tampilan lokal menampilkan dua tonggak — yang sebelumnya dan yang berikutnya, dengan jarak dibulatkan dalam satuan yang ditampilkan dan prioritas bagi pertemuan — dan, ketika tonggak masih jauh, sebuah acuan absolut yang dibulatkan dengan pertambahan lokal, agar gerak tetap terasa; pembacaan di bagian bawah berbeda antara kedua tampilan, dan jarak di kapal hingga titik berhenti adalah jarak tersisa dibagi γ . Panel radiasi menggambar λB_{λ} yang dinormalisasi terhadap puncaknya sendiri untuk Matahari di buritan dan CMB di haluan, dan membandingkan, pada sebuah pita energi, iradians Matahari $L_{\odot}/(4\pi d^2) \cdot D^2$ dengan iradians CMB di haluan (Bagian 5): latar kosmik melampaui Matahari sebelum tahun pertama waktu kapal; pada pembalikan nilainya 217 W/m^2 berbanding $5,4 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2$ dari Matahari di buritan — faktor $\approx 4 \times 10^{23}$ — dan, pada kedatangan, dengan kapal diam, $\approx 5 \times 10^8$. Kamera belakang menggabungkan Bumi atau Matahari dengan tanggal pemancaran, umur cahaya, dan faktor gerak lambat (9); jendela depan dan belakang diperbarui pada 10 dan 5 Hz saat jelajah.

9.2 Cahaya kabin

Kabin adalah satu citra tunggal dengan tiga lapisan cahaya yang dihitung: siklus sirkadian (siang dari pukul 07 hingga 19, malam dari pukul 22 hingga 05 pada 55% dengan rona hangat, dengan landaian di antaranya) secara perkalian; cahaya yang masuk melalui jendela, secara penjumlahan — jumlah cahaya siang Bumi selama fase naik ($0,15 \cdot e^{-h/8.500 \text{ m}}$) dengan iradians CMB yang dikonversi dengan fraksi tampak benda hitam pada suhu haluan dan dinormalisasi dengan 550 W/m^2 , yang menghasilkan 0,32% cahaya Matahari tampak pada 7 tahun dan 5,37% pada pembalikan (sebuah pendekatan pencahayaan: suhu CMB

bervariasi menurut arah dan koefisiennya menggunakan suhu di haluan); dan pantulan kaca, yang opasitasnya $0,09 \cdot \text{tingkat} / (1 + \text{cahaya luar} / 0,005)$ berkurang ketika ada cahaya dari luar. Pelat pembuat dan bayangan-bayangan kabin mengikuti lapisan-lapisan ini; tidak ada fotometri terkalibrasi.

9.3 Jurnal dan radio

Jurnal kapal dihasilkan oleh modul-modul tonggak yang menerima fungsi keadaan dan sebuah pemecah biseksi: setiap tonggak (lepas gravitasi, orbit, 1 hari cahaya, heliopause, Oort, suhu CMB, setengah sudut aberasi, "+100 tahun di Bumi", bintang acuan seperti Proxima, Sirius, Vega, dan Betelgeuse, ambang kecepatan, pembalikan, kedatangan) adalah saat τ yang dihitung, bukan ditulis tangan, dan 108 fakta konteks menyertai tonggak-tonggak itu dengan sumber yang dicatat dalam kode. Radio kapal adalah pita berita dengan 2.415 kalimat yang ditulis sebelumnya (241 asli dan 2.174 dari sebuah perluasan), dalam tiga suara — Borealis dan dua pegawai fiktif, Bu Ratna, dari Direktorat Kepatuhan dan Integritas Aset, dan Pak Budi, dari Dukungan Operasional dan Kontinjensi. Komentar-komentar katalog mengikuti batasan editorial tentang digit, dengan pengecualian untuk "1 g" dan "24 h/24 jam"; penganalisis juga mempertahankan moto kapal yang telah disetujui. Bilangan yang ditulis dengan huruf diperbolehkan dalam humor administratif, tetapi tidak untuk memperkenalkan data fisis. Nilai-nilai dalam laporan berasal dari simulasi; tinjauan editorial dan uji memverifikasi bahwa komentar tidak mengarang pembacaan atau kerusakan, maupun bertentangan dengan tonggak. Distribusinya deterministik: setiap kalimat memiliki fase penerbangan dan topik, dipilih berdasarkan tonggak sebelumnya atau berikutnya serta jendela kedekatan, tidak diulang sebelum 15 menit (riwayat 24 terakhir), dan tanggapan para tokoh kedaluwarsa dalam 5 menit atau ketika fase berubah; pesan yang sudah usang dibuang. Tidak ada pembuatan teks oleh AI secara waktu nyata.

10. Implementasi dan ketangguhan numerik

10.1 Arsitektur

Aplikasi ini statis: HTML, CSS, JavaScript (modul ES), dan WebGL2, tanpa pustaka runtime. Fungsi keadaan (Bagian 2) murni dan deterministik; loop bingkai membaca jam, menghitung keadaan, dan memperbarui panel, langit, kamera belakang, dan radio. Langit menggunakan pass HDR titik (bintang, dengan PSF gaussian dan cakram fisis bila terpisahkan), pass latar (Bima Sakti difus, Bumi, atmosfer), pass volumetrik untuk nebula (setengah resolusi hingga Pilar menempati lebih dari 40 px), dan pass komposisi akhir yang menjumlahkan CMB dalam 32 bit dan menerapkan (13). Laju bingkai dipilih per fase: 60 Hz pada lintas dekat, 30 Hz pada dua hari pertama, 10 Hz saat jelajah (5 Hz pada kamera belakang), karena saat jelajah tidak ada yang berubah pada skala bingkai.

10.2 Formulasi yang stabil

Beberapa besaran perjalanan memiliki rasio berorde 10^7 – 10^{19} antara keberangkatan dan pembalikan, dan presisi ganda ($2^{-52} \approx 2,2 \times 10^{-16}$) tidak memadai untuk bentuk-bentuk naif. Pilihan-pilihannya:

- **Rapiditas sebagai variabel keadaan.** η linear terhadap τ (5); β , γ , dan $\varepsilon = 1 - \beta$ diturunkan darinya: $\varepsilon = 2/(e^{2\eta} + 1)$ menghindari pembatalan $1 - \tanh \eta$ (yang jenuh pada 10^{-16}) dan merepresentasikan nilai yang jauh lebih kecil, dalam batas titik mengambang. Pada pembalikan $\varepsilon = 3,84 \times 10^{-8}$: kecepatan berada 41,5 km/jam dari c dan angka ini ditampilkan dengan dua digit signifikan.
- **Jarak yang tersisa.** $D - r$ akan kehilangan kilometer-kilometer terakhir dari $6,6 \times 10^{19}$ m (pada besaran itu jarak antar-double adalah 8.192 m); pengereman menggunakan (8), yang menuju nol secara kontinu, dan peta rute mengonversinya ke kilometer dari situ.

- **Selisih fungsi hiperbolik.** (6) menggunakan identitas hasil kali-ke-jumlah alih-alih $\cosh \eta - \cosh \eta_1$, yang akan kehilangan digit pada awal fase 2.
- **Doppler dan aberasi.** (10) dan (11) tidak pernah membentuk $1 - \beta \cos \theta$; sudut dipropagasikan sebagai $\tan(\theta/2)$, dengan cabang $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$ dan $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$; batas $\tan(\theta'/2) > 10^{15}$ diperlakukan sebagai $\theta' = \pi$. Komposisi dengan dipol Matahari menghitung $\gamma - |\gamma\beta|$ sebagai $e^{-\eta}$.
- **Bahan bakar.** Fraksi melalui $\exp m1/\exp$ dan cadangan dihitung secara langsung; dalam pemformatan radio, persentase dalam bilangan bulat desimal (BigInt) agar 99,9...% dan 0,0...1% berjumlah 100% tanpa membulatkan cadangan menjadi nol.
- **Latar kosmik.** Radians dalam tabel logaritmik; suhu melalui $|d - \text{sumbu}|^2$, stabil di apeks; integrasi per piksel dengan konservasi fluks, kriteria subdivisi dalam satuan sudut; penjumlahan dalam 32 bit di luar *buffer* presisi setengah milik bintang-bintang, yang dibatasi pada 60.000 agar tidak meluap.
- **Kedalaman.** Pengodean logaritmik $\log_2(1 + d)/34$, dengan d dalam tahun cahaya, yang digunakan bersama oleh bintang dan nebula: rentang banyak orde besaran dalam *buffer* yang sama — rentang yang dapat direpresentasikan, bukan resolusi; dalam float32 suku $1 + d$ kehilangan pertambahan di bawah $\sim 10^{-7}$ tc.
- **Jam.** Penyelarasan dengan server melalui HEAD (sebuah perkiraan, Bagian 3.1); T_0 dan waktu-waktu lainnya adalah bilangan bulat milidetik; $\tau = t - T_0$ eksak dalam presisi ganda selama $\sim 10^5$ tahun.

10.3 Verifikasi

Repositori mencakup 128 uji otomatis dalam 19 berkas (Node.js), yang dijalankan pada setiap perubahan, dan dua halaman verifikasi di peramban (806 pemeriksaan peta rute dan 2.804 pemeriksaan teks radio). Di antara uji fisis: iradians CMB terhadap kedua limit analitisnya; emisivitas $H\alpha$ terhadap hubungan ukuran emisi-Rayleigh; penghentian dengan $v = 0$ dan pembakaran total pada τ_{fim} ; kecepatan pada lintas dekat (perpindahan = $\gamma\beta c \cdot \Delta\tau$); stabilitas CMB setelah satu jam simulasi dan independensi dari riwayat; tidak adanya puncak buatan di buritan; citra Bumi pada kamera belakang; dan replika CPU dari shader titik terhadap 109.400 bintang HYG, yang menetapkan batas magnitudo dalam keadaan diam (dikelompokkan menurut bagian bulat magnitudo: setiap bintang hingga mag 7 terlihat; 30–60% dari mag 8; tidak satu pun dari mag 9; 50.000–62.000 terlihat di seluruh langit), warna putih Sirius, bertambahnya bintang di depan setelah 1 tahun waktu kapal, dominasi bintang-bintang dingin yang tergeser pada 3 tahun, dan cincin 1° dengan 300–2.000 bintang pada pembalikan. Pembersihan versi 1.0 diperiksa dengan perbandingan piksel demi piksel dari keadaan yang dibekukan (0,03% piksel berbeda, hanya digit yang berubah mengikuti jam). Angka-angka dalam bagian ini mengacu pada situs versi 1.1.0, tertanggal 19/10/2026: uji dijalankan dengan `node --test check-*.mjs` di folder `hybrid/`, dan halaman verifikasi dibuka di peramban (`check-route.html`, `check-radio.html`); sumber data dan jaring, beserta hash berkasnya, ada di halaman "Sumber dan kredit". Uji-uji ini memverifikasi konsistensi internal dengan model; ini bukan validasi observasional — lulus uji tidak mengalibrasi foto-foto maupun membuktikan bahwa mata manusia akan melihat kecerahan itu.

10.4 Publikasi dan waktu nyata

Situs dipublikasikan sebagai berkas statis; publikasi mencap versi, sebuah pengenalan build, dan saat $T_0 = 1792422000000$ ms (epoch Unix), yang disegel: setiap publikasi berikutnya mengulang T_0 yang sama, dan pintasan waktu yang digunakan dalam pengembangan diabaikan pada salinan yang dipublikasikan. Saat tersebut sama bagi semua pengunjung; keadaan yang ditampilkan adalah fungsi keadaan yang dievaluasi pada jam nyata.

11. Batasan dan masalah yang diketahui

Penyederhanaan dicantumkan untuk publik di halaman "Lisensi puitis"; di sini penyederhanaan itu disusun menurut jenisnya, beserta apa yang diketahui tentang besarnya.

11.1 Kemustahilan yang diakui

- **Propulsi.** Roket foton sempurna tidak ada. Rasio massa $5,2 \times 10^7$ untuk 100 t massa kering total, dan daya $1,68 \times 10^{22}$ W saat keberangkatan, berada di luar rekayasa apa pun yang dikenal. Dalam model yang disederhanakan dengan fraksi konstan $1 - f$ dari energi massa yang hilang dipancarkan dalam foton terkolimasi, dan sisanya lolos secara isotropik dalam kerangka sesaat kapal, rasio massanya adalah $e^{b_{\text{fim}}/(1-f)}$: sebagai contoh hipotetis, efisiensi 50% menaikkan rasio dari $5,2 \times 10^7$ menjadi $2,7 \times 10^{15}$ — persentase ini tidak mewakili efisiensi universal mesin antimateri. Massa tangki, radiator, dan cadangan adalah nol.
- **Perisai dan awak.** Fluks $5,9 \times 10^{10}$ W/m² ($n = 0,1$ cm⁻³) tanpa efek pada kapal; dosis, erosi oleh butiran, radiasi sekunder, dan ionisasi tidak dimodelkan; pembalikan seketika; 1 g tanpa henti setelah fase naik, pada percepatan dan pengereman (nol saat berhenti); tanpa sistem pendukung kehidupan.
- **Peluncuran.** Naik vertikal tanpa atmosfer, hambatan udara, rotasi (465 m/s), atau orbit Bumi (29,8 km/s), tanpa orbit parkir; berangkat dari orbit 400 km akan mengubah 0,008% bahan bakar dan 41 menit waktu kapal. Arah naik adalah arah rute, yang akan mensyaratkan M16 berada di zenit pangkalan pada T_0 ; pada tengah hari 19/10/2026 nebula itu berada pada ketinggian $\sim 30^\circ$ di bujur tersebut, dan orientasi visual Bumi yang tetap menyembunyikan perbedaan itu.

11.2 Batasan data

- **Jarak.** 7.000 tc ke pusat M16 adalah nilai klasik; paralaks Gaia DR2 memberikan 1.740 ± 130 pc $\approx 5.700 \pm 400$ tc untuk NGC 6611 [18]. Perbedaan ini hanya sedikit mengubah waktu kapal ($17,2 \rightarrow 16,8$ tahun, karena logaritma pada (7)), tetapi mengubah waktu di Bumi sebesar ~ 1.300 tahun dan menskalakan semua dimensi nebula (tinggi Pilar $8,6 \rightarrow 7,0$ tc).
- **Nebula.** Seluruh kedalaman adalah hipotesis: lembaran, bidang bersama bintang, pangkat penajaman, konversi $\tau_f \rightarrow \tau_v$, albedo, g , κ , satu ukuran emisi tunggal; hanya delapan dari ~ 500 bintang gugus yang menerangi gas; spektrum garis dari satu titik, hanya optis; tanpa hamburan berganda; nebula ditampilkan seperti dalam foto-foto — cahaya yang dipancarkan ~ 6.992 tahun sebelum 2026, pada jarak yang diadopsi —, sedangkan pada kedatangan, 6.987 tahun Bumi setelah keberangkatan, kapal menerima cahaya yang dipancarkan ~ 7 tahun sebelum saat itu: di antara kedua epoch yang teramati terdapat ~ 14.000 tahun evolusi yang tidak dimodelkan. Menurut laju fotoevaporasi terukur (McLeod et al. [15]: $\sim 70 M_\odot/\text{Myr}$, umur ~ 3 Myr) perubahannya akan kecil. Dugaan adanya supernova baru-baru ini berdasarkan data Spitzer [19] adalah hipotesis yang dipopulerkan; citra Hubble 1995 dan 2014 [13] hanya merekam perubahan kecil pada Pilar.
- **Katalog.** 299.858 bintang dibandingkan miliaran yang nyata; bintang-bintang redup dan jauh tidak ada, terutama yang akan dibawa aberasi ke jendela di dekat M16; adendum Gaia tidak memiliki kecepatan (diam) dan dipilih dengan sumbu rute $0,1^\circ$ lebih awal dari yang sekarang; suhu menurut warna atau kelas, spektrum tanpa garis.
- **Debu.** Model cakram halus (12), tanpa awan nyata di arah Serpens/Aquila; Bima Sakti difus dan galaksi eksternal sintetis.
- **Gerak M16.** Tidak ada kecepatan relatif Matahari-gugus; skala dari yang diabaikan adalah 0,024 tc dalam 7.000 tahun per km/s.

11.3 Pilihan adegan

- **Pertemuan.** Planet ditempatkan pada perlintasan jari-jari orbit, pada sisi berselang-seling, pada 1,5 jari-jari; pencahayaan dari arah tetap (fase tidak nyata); tanpa Doppler warna maupun penguatan radians pada planet (hingga 3,7% dalam frekuensi dan 15,5% dalam radians dengan $\beta \leq 0,036$; di awan Oort, $\beta = 0,25$ dan $D \approx 1,3$ hampir akan melipatgandakan kecerahan); cincin Saturnus sintetis, dengan tepi hingga 0,55% dari yang nyata; cincin Uranus dengan pita selebar 400–1.500 km dibandingkan 1–10 km yang nyata; bulan-bulan Jupiter tetap; Charon ~20% lebih dekat ke Pluto daripada kenyataannya; dua puluh batuan sebagai sabuk; awan Oort dengan sembilan kelompok rekaan dalam 24 jam (frekuensi nyata ≈ 0); "dinding" Gelembung Lokal pada 300 tc, artistik.
- **Bumi.** Peta Blue Marble 2004 dengan awan historis; Bumi yang ditampilkan tidak berotasi (meridian dan terminator pada T_0); tanpa meteorologi, musim, atau lampu kota.
- **Kabin dan persepsi.** Satu citra tunggal dengan lapisan-lapisan cahaya; tanpa suara, getaran, atau bobot; kamera dengan eksposur tetap, tanpa adaptasi mata maupun kalibrasi fotometrik monitor; pantulan kaca adalah lapisan visual, bukan simulasi optis.
- **Narasi.** Kapal, pangkalan, pelat, dan radio kapal (2.415 kalimat, tokoh fiktif, tanpa pembacaan maupun kerusakan rekaan) adalah fiksi; perusahaannya nyata.

11.4 Inkonsistensi internal yang diketahui

- Kerapatan medium dalam perhitungan perisai adalah $0,1 \text{ cm}^{-3}$ sepanjang perjalanan, sedangkan perkiraan kecerahan terhambur dari semburan buang menggunakan 1 cm^{-3} pada rute dan 100 cm^{-3} di rongga M16; di dalam heliosfer nilainya lain lagi. Panas pada perisai bervariasi dengan faktor 10 tergantung pilihan tersebut.
- Luminositas Matahari muncul sebagai $3,83 \times 10^{26} \text{ W}$ dalam satuan panel energi dan $3,828 \times 10^{26} \text{ W}$ dalam tonggak (0,05%).
- Teks jurnal menyebut titik akhir sebagai "kedatangan di Pilar", sedangkan peta menyebutnya titik berhenti, 6,9 tc dari sisi terdekat.

11.5 Hipotesis dan sensitivitas model

- Suhu kesetimbangan perisai menggunakan radiasi dari satu sisi; dari dua sisi suhunya akan $2^{-1/4}$ (16%) lebih rendah.
- Penajaman fotografis yang dibalik (pangkat 2,4), faktor 1,725 jaring, batas atas $\tau_v \leq 8$, dan kisi $142 \times 234 \times 218$ adalah pilihan rancangan yang terdokumentasi, bukan pengukuran; mengubahnya mengubah rupa nebula tanpa bertentangan dengan data apa pun.

12. Kesimpulan

Borealis Horizon menunjukkan bahwa sebuah perjalanan relativistik dapat disajikan kepada publik dengan angka yang benar, dalam waktu nyata, selama 17 tahun, dengan kode yang muat di sebuah peramban: kinematika dalam bentuk tertutup, cahaya yang ditransformasikan arah demi arah, latar kosmik yang dihitung dari hukum Planck, dan nebula yang dibangun dari pengamatan publik, semuanya di bawah eksposur tetap dan pilihan visual yang terdokumentasi. Harganya adalah penyederhanaan yang dinyatakan — mesin dan perisai yang tidak ada, distribusi volumetrik nebula yang tidak dapat ditentukan oleh pengamatan saja, planet-planet yang ditempatkan di tempat yang terlihat indah — dan dokumen ini menjadikannya eksplisit, beserta besarnya masing-masing, agar pembaca tahu persis apa yang sedang dilihatnya.

Daftar Pustaka

- [1] Rindler, W. *Relativity: Special, General, and Cosmological*. Ed. ke-2, Oxford University Press, 2006.
- [2] Møller, C. *The Theory of Relativity*. Ed. ke-2, 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); bentuk setengah sudut aberasi diturunkan dari transformasi Lorentz kosinus arah.
- [5] Peebles, P. J. E.; Wilkinson, D. T. "Comment on the anisotropy of the primeval fireball". *Physical Review* 174, 2168 (1968) — radians $\propto D^4$ dan invariansi 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 untuk 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), pers. 29.2: $T_0 = 2,7255$ K; dipol 369,82 km/s ke arah $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$. 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) dan siaran pers 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* (Januari 2004) dan *Blue Marble Clouds*.
- [21] Solar System Scope. *Solar System Textures* (CC BY 4.0); NASA/JHUAPL/SwRI, peta Pluto (New Horizons).
- [22] Ashby, N. "Relativity in the Global Positioning System". *Living Reviews in Relativity* 6, 1 (2003).

Lampiran A. Konstanta dan parameter

Simbol	Nilai	Penggunaan
c	299.792.458 m/s	eksak
g_0	9,80665 m/s ²	percepatan proper jelajah
tahun	365,25 hari = 31.557.600 s	tahun cahaya = $9,4607 \times 10^{15}$ m; kalender kapal
SA	$1,495978707 \times 10^{11}$ m	kecepatan proper; tonggak
$R_{\oplus}$	6.371 km	$GM = g_0 R_{\oplus}^2$
T_0 (CMB)	2,7255 K	monopol
dipol Matahari	369,82 km/s; (l, b) = (264,021°, 48,253°)	komposisi dengan boost kapal
σ	$5,670374419 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$	iradians, perisai
$m_p c^2$	$1,50327759 \times 10^{-10} \text{ J}$ (938,27 MeV)	fluks pada perisai
n	0,1 cm ⁻³	kerapatan medium (perisai)
m_{fim}	100 t	massa kering
D, jarak	7.000 tc (pusat M16); 6.992 tc (bidang Pilar); 6.985 tc (titik berhenti)	rute
arah rute	$l = 16,890922^\circ$, $b = 0,753177^\circ$	sepertiga atas Pilar
debu	$K = 5,1 \times 10^{-4} \text{ tc}^{-1}$; $H = 330 \text{ tc}$; $z_0 = 65 \text{ tc}$; kanal (-0,18; 0; 0,30)	ekstingsi
eksposur	$E_{\text{gelap}} = 5.400$ pada 1.200 px/rad; $\sigma_{\text{PSF}} = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad})$	langit
nebula	skala 1,725; lembaran 15 tc (σ 3), 8,5 tc (σ 2), bintang 3,2 tc; $\tau_v = \tau_f(1 + 2,6\tau_f)$; albedo 0,5; $g = 0,6$; $\kappa = 6 \text{ tc}^{-1}$; 224 sampel	transfer

Kedalaman optis dari (12) di sepanjang segmen dengan panjang d antara ketinggian z_0 dan z_1 (diukur dari bidang): $\tau = K d e^{-|z|/H}$ jika $|z_1 - z_0| < 10^{-3} d$, dan, jika tidak, $\tau = (K d / \Delta z) [\text{sgn}(z_1) H (1 - e^{-|z_1|/H}) - \text{sgn}(z_0) H (1 - e^{-|z_0|/H})]$.

Lampiran B. Tonggak perjalanan

Tonggak	Waktu kapal	Keadaan
Lepas dari gravitasi Bumi ($v^2 = 2GM/r$)	44 menit	fase naik pada 0,1–1 g bersih
Bulan (jari-jari orbit)	2,98 jam	307 ribu km/jam; 41 s untuk melintasi diameter
Akhir fase naik (awal bentuk tertutup)	24 jam	$34,9 \times 10^6$ km; 827 km/s
Mars · Ceres · Jupiter	2,19 · 3,27 · 4,59 hari	lintas dekat bertata panggung pada 1,5 jari-jari
Saturnus · Uranus · Neptunus · Pluto	6,25 · 8,87 · 11,1 · 12,7 hari	Pluto pada $38,7 \times 10^6$ km/jam
Awan Oort (2.000 SA)	90,2 hari	$\beta = 0,25$; keluar dari model (100.000 SA) pada hari ke-574
Gelembung Lokal (300 tc)	6,23 tahun	$\gamma \approx 310$
CMB 1.000 K di haluan	5,72 tahun	Tabel 2
Pembalikan	8,606 tahun	$\gamma = 3.606$; 3.493 tahun di Bumi; 3.492,5 tc
Titik berhenti	17,211 tahun	6.985 tc; 6.987 tahun di Bumi; $v = 0$; bahan bakar nol

Borealis Dynamics · Borealis Horizon, versi 1.1.0 · Sumber dan lisensi setiap sumber daya ada di halaman "Sumber dan kredit" situs; penyederhanaan, di "Lisensi puitis"; perubahan setiap versi, di "Versi". Situs ini nonkomersial, edukatif, dan gratis.