

Borealis Horizon: eine relativistische Reise in Echtzeit zu den Säulen der Schöpfung — Modell, Implementierung und Grenzen

Borealis Dynamics

Öffentliches Experiment unter <https://ngc6611.pages.dev> · Version 1.1.0 der Website · Start am 19. Oktober 2026, 12:00 Uhr (UTC-3) · Dokument vom 19.10.2026

ZUSAMMENFASSUNG

Die Borealis Horizon ist eine öffentliche, im Browser ausgeführte Simulation einer interstellaren Reise mit konstanter Eigenbeschleunigung von 1 g von der Erde bis zu einem Punkt 7 Lichtjahre vor den Säulen der Schöpfung (M16), wobei im Bezugssystem der Erde 6.985 Lichtjahre zurückgelegt werden. Die Simulation läuft in Echtzeit ab einem bei der Veröffentlichung festgelegten Startzeitpunkt: Der Beobachter sieht in jeder Bordsekunde den vom Modell vorhergesagten kinematischen Zustand — beim Aufstieg durch numerische Integration, in den relativistischen Beschleunigungs- und Bremsphasen durch Ausdrücke in geschlossener Form gewonnen — und den Himmel, den eine Kamera mit fester Belichtung aufzeichnen würde. Dieser Artikel dokumentiert das physikalische Modell (hyperbolische Bewegung in geschlossener Form mit einer newtonschen Anfangsphase, nach Runge-Kutta integriert; Zeitdilatation; Signalverzögerung und Beschleunigungshorizont; Aberration und Doppler-Verschiebung von Farbe und Helligkeit; interstellare Extinktion; kosmischer Mikrowellenhintergrund, Richtung für Richtung transformiert; dreidimensionale Rekonstruktion des Adlernebels aus öffentlichen Fotografien; ideale Photonenrakete), die Implementierungsentscheidungen (numerisch stabile Formulierungen für γ bis $\sim 10^4$, vorberechnete Tabellen, flusserhaltende Integration, Verifikation durch Regressionstests) und die bekannten Grenzen. Mit $\gamma = 3.606$ bei der Schubumkehr, 17,21 Bordjahren und 6.987 Jahren auf der Erde wird die Reise als Visualisierungsexperiment präsentiert: getreu, wo die Physik berechenbar ist, und erklärtermaßen vereinfacht, wo die Technik oder die Daten fehlen.

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.

Schlüsselwörter: spezielle Relativitätstheorie; hyperbolische Bewegung; Aberration; Doppler-Effekt; kosmischer Mikrowellenhintergrund; Adlernebel; wissenschaftliche Visualisierung; WebGL. **Keywords:** special relativity; hyperbolic motion; aberration; Doppler effect; cosmic microwave background; Eagle Nebula; scientific visualization; WebGL.

1. Einleitung und Konzeption des Experiments

Reisen mit konstanter Eigenbeschleunigung sind das klassische Beispiel dafür, wie die spezielle Relativitätstheorie galaktische Entfernungen in menschliche Zeitspannen verwandelt: Die Rapidität wächst linear mit der Eigenzeit, und die zurückgelegte Strecke wächst exponentiell mit ihr [1, 2]. Was man selten sieht, ist das *Aussehen* einer solchen Reise — wie sich der Himmel nach vorn zusammendrängt, wie sich die Farben ändern, wie der kosmische Mikrowellenhintergrund (CMB) zu einem sichtbaren Lichtfleck wird, wie das Bild der Erde hinter dem Schiff erstarrt —, ohne Abkürzungen dargestellt, mit den korrekten Zahlen, über die tatsächliche Dauer der Reise.

Die Borealis Horizon ist dieses Experiment. Das Schiff startet von einer fiktiven Küstenbasis, steigt mit einem Schub von 1,1 g auf, geht zu einer konstanten Eigenbeschleunigung von 1 g über, kehrt den Schub in der Mitte der Strecke um und kommt, in Ruhe relativ zur Erde, 7 Lichtjahre vor der Ebene der Säulen der Schöpfung nach 6.985 Lichtjahren zum Stillstand. Die Simulation läuft in einem gewöhnlichen Browser (HTML, JavaScript und WebGL2, ohne externe Bibliotheken), und der Startzeitpunkt, $T_0 = 19.10.2026\ 12:00:00\ \text{UTC}-3$, wurde bei der Veröffentlichung festgeschrieben: Alle Besucher sehen dasselbe Schiff am selben Punkt in Echtzeit. Es gibt keine Zeitraffung, keine Pause und kein Zurückspulen; die Reise dauert 17,21 Bordjahre in realer Laufzeit der Website.

Der Entwurf folgt drei Prinzipien. (i) *Treue, wo gerechnet wird*: Kinematik, Uhren, Licht und kosmischer Hintergrund werden aus den physikalischen Gesetzen berechnet, ohne inszenierte Effekte. (ii) *Feste Belichtung*: Verstärkung und Tonkompressionsfunktion des Fensters sind vorab festgelegt, ohne automatische Anpassung der Belichtung an die Szene. (iii) *Erklärte Vereinfachung*: Was die Technik nicht zu leisten vermag (der Antrieb, der Schild) und was die Daten nicht enthalten (die dritte Dimension des Nebels), wird ausdrücklich eingeräumt und für die Öffentlichkeit auf der Seite „Dichterische Freiheit“ der Website aufgeführt. Dieser Artikel ist das technische Gegenstück zu dieser Liste: Er beschreibt das Modell, die Formeln, die Implementierung und die bekannten Probleme.

Abschnitt 2 stellt das Bewegungsmodell vor; Abschnitt 3 Zeit und Signale; Abschnitt 4 das Licht (Aberration, Doppler-Effekt, Extinktion, Kataloge, Belichtung, Erde); Abschnitt 5 den kosmischen Hintergrund; Abschnitt 6 die Rekonstruktion des Adlernebels; Abschnitt 7 Antrieb, Energie und den Fluss auf den Schild; Abschnitt 8 die inszenierten Begegnungen; Abschnitt 9 die Instrumente, das Logbuch und den Bordfunk; Abschnitt 10 die Implementierung und die numerische Robustheit; Abschnitt 11 die Grenzen und die bekannten Probleme. Die Anhänge fassen Konstanten, Parameter und Meilensteine zusammen.

2. Bewegungsmodell

2.1 Aufstiegsphase ($\tau < 24\ \text{h}$)

Die Trajektorie ist eine reine Funktion der Bordzeit τ (Sekunden seit dem Start), definiert in zwei Phasen. In der ersten, mit einer festen Dauer von einem Bordtag, steigt das Schiff radial von der Erdoberfläche auf, unter der Erdschwerkraft und einem Schub pro Masseneinheit

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

mit $GM = g_0 R_\oplus^2$ ($g_0 = 9,80665\ \text{m/s}^2$, $R_\oplus = 6.371\ \text{km}$), sodass der Schub auf der Startplattform 1,1 g beträgt und auf g_0 übergeht, sobald $1,1\ GM/r^2$ unter g_0 fällt, in 311 km Höhe ($r = R_\oplus\sqrt{1,1}$). Die resultierende Beschleunigung ist $a(r) - GM/r^2$: anfangs 0,1 g netto, ansteigend auf praktisch 1 g, während

die Erdschwerkraft schwindet. In dieser Phase gibt es weder Atmosphäre noch Luftwiderstand, Erdrotation, Sonne oder Mond (Abschnitt 11). Das System

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

wird mit einem Runge–Kutta-Verfahren vierter Ordnung und vorgeschriebener variabler Schrittweite $h = 0,02 + 5 \times 10^{-4} \tau$ integriert (von 20 ms am Boden bis 43 s am Ende des Tages), wobei die Tabellen τ , r , v und die Beschleunigung gespeichert werden. Da während des ganzen Tages $v \ll c$ gilt (827 km/s am Ende), wird die Phase newtonsch behandelt; die relativistische Korrektur geht über zwei Integrale ein, die zusammen mit dem Zustand akkumuliert werden: die *Brenngröße* b (durch den Schub akkumulierte Rapidität, Abschnitt 7),

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

in jedem Schritt mit der Simpsonregel integriert, und die Erdzeit $t_\oplus$, mit der Dilatation in erster Ordnung in v^2/c^2 ,

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

ausgewertet mit dem Mittelwert von v^2 an den Schritttenden. Am Ende des Tages ist das Schiff 34,9 Millionen Kilometer vom Erdmittelpunkt entfernt, bei 827 km/s, mit $t_\oplus - \tau = 0,107$ s. Zwischen den Tabellenknoten wird der Zustand durch kubische Hermite-Polynome mit den bekannten Ableitungen interpoliert (v für r , a für v), was die Stetigkeit von r , v und der angezeigten Beschleunigung erhält.

2.2 Relativistische Phase: hyperbolische Bewegung in geschlossener Form

Ab $\tau_1 = 86.400$ s ist die Eigenbeschleunigung konstant, $a = g_0$, und die Trajektorie ist die hyperbolische Bewegung nach Rindler [1, 3]. Mit der Rapidität η , definiert durch $\beta = \tanh \eta$ und $\gamma = \cosh \eta$, ergibt die konstante Eigenbeschleunigung

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

mit $\eta_1 = \operatorname{artanh}(v_1/c) = 2,76 \times 10^{-3}$, der Rapidität am Ende des Aufstiegs. Radiale Position und Erdzeit lauten für $\tau_1 \leq \tau < \tau_F$

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

das sind die Identitäten $\cosh \eta - \cosh \eta_1 = 2 \sinh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ und $\sinh \eta - \sinh \eta_1 = 2 \cosh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$, geschrieben ohne die Subtraktion zweier fast gleicher Zahlen (Abschnitt 10). Die Schubumkehr erfolgt bei der Rapidität η_F , für die die symmetrische Bremsphase von η_F bis null genau die verbleibende Strecke bis zum Ziel $D = 6.985$ Lj abdeckt:

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

gewonnen durch Gleichsetzen von $r(\eta_F) + (c^2/a)(\cosh \eta_F - 1) = D$. In der Bremsphase ($\tau_F \leq \tau < \tau_{\text{fim}}$) nimmt die Rapidität linear ab, $\eta = (\tau_{\text{fim}} - \tau) a/c$, und die verbleibende Strecke ist

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

Tabelle 1 fasst die Werte zusammen. Die Skala $c/a = 0,9687$ Jahre ist die natürliche Konstante der Reise: Alle 0,9687 Bordjahre kommt eine Einheit Rapidity hinzu; jede weitere „9“ im Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit kostet dasselbe Stück Band, wie das Rapiditysband der Geschwindigkeitsanzeige zeigt.

Tabelle 1. Charakteristische Werte der Trajektorie ($a = g_0$, $D = 6.985$ Lichtjahre).

Größe	Wert	Bemerkung
Ende des Aufstiegs, τ_1	86.400 s	$r_1 = 3,49 \times 10^7$ km, $v_1 = 827$ km/s, $\eta_1 = 2,76 \times 10^{-3}$
Rapidity bei der Schubumkehr, η_F	8,8836	$\gamma_F = 3.606,3$; $1 - \beta_F = 3,84 \times 10^{-8}$ (bis c fehlen 41,5 km/h)
Schubumkehr, τ_F	8,6057 Jahre	$t_{\oplus} = 3.493,47$ Jahre; $r_F = 3.492,5$ Lj
Ankunft, τ_{fim}	17,2114 Jahre	6.286,5 Bordtage; $t_{\oplus} = 6.986,94$ Jahre
Maximale Eigengeschwindigkeit, $\gamma\beta c$	7,23 AE/s	Strecke auf der Karte der Galaxis pro Bordsekunde
Kontrahierte Strecke bei der Schubumkehr, D/γ_F	1,94 Lj	die gesamte Route, an Bord gemessen
Gesamte Brenngröße, b_{fim}	17,7672	Massenverhältnis $e^b = 5,20 \times 10^7$ (Abschnitt 7)

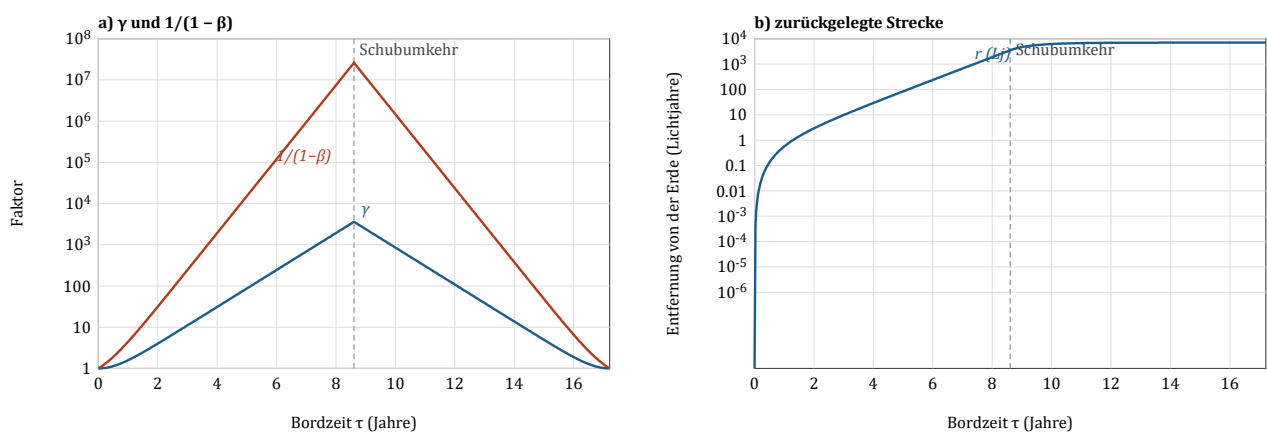


Abbildung 1. Kinematik der Reise als Funktion der Bordzeit, nach den Gleichungen (5)–(8): (a) der Lorentzfaktor $\gamma = \cosh \eta$ und $1/(1 - \beta) = (e^{2\eta} + 1)/2$ wachsen exponentiell bis zur Schubumkehr ($\gamma = 3.606$; $1 - \beta = 3,8 \times 10^{-8}$) und nehmen in der Bremsphase symmetrisch ab; (b) die Entfernung von der Erde in Lichtjahren, in logarithmischer Skala — das Schiff überschreitet 1 Lichtjahr nach 1,29 Bordjahren und die Hälfte der Strecke (3.492,5 Lj) bei der Schubumkehr.

2.3 Momentanzustand und Meilensteine

Für jedes τ liefert die Zustandsfunktion Phase, τ , $t_{\oplus}$, r , v , η , β , γ , $\varepsilon = 1 - \beta$, angezeigte Beschleunigung und Brenngröße. Meilensteine, die durch eine Entfernung oder eine physikalische Größe definiert sind (Entkommen aus der Erdschwerkraft, Planetenbahnen, 1 Lichttag, Heliopause, Oortsche Wolke, Lokale Blase, Temperaturschwellen des CMB, Entfernungen von Referenzsternen), werden durch Bisektion über die Zustandsfunktion bestimmt, mit höchstens 200 Iterationen und Abbruch, sobald der Mittelpunkt in doppelter Genauigkeit mit einem Intervallende zusammenfällt; Meilensteine fester Dauer und Kalendermeilensteine werden direkt konstruiert. Ein Meilenstein wie „Entfernung von Proxima Centauri“ bedeutet, von der Erde aus die Entfernung dieses Sterns (4,25 Lj) zu erreichen — nicht, an ihm vorbeizufliegen. Derselbe Zustand speist alle Anzeigen, das Logbuch, den Bordfunk und den Himmel: Es gibt keine zweite Quelle der Wahrheit.

3. Zeit und Signale

3.1 Uhren

Die Borduhr ist die reale Uhr des Besuchers, über den Date-Header einer HEAD-Anfrage an die des Servers angeglichen — eine Schätzung der Angleichung, keine Garantie: Der Header hat eine Auflösung von 1 s, das Netz kann asymmetrisch sein, und schlägt die Anfrage fehl, gilt die lokale Uhr —, und $\tau = t_{\text{jetzt}} - T_0$. Die Anzeige „Erde voraus“ zeigt $t_{\oplus} - \tau$ mit dynamischer Einheit. Anfangs wächst die Differenz nach (4) wie $a^2\tau^3/(6c^2)$: 1,8 Attosekunden in der ersten Sekunde, 1 Pikosekunde erst nach 82 s — in den ersten Sekunden unterhalb der Auflösung der Integration in doppelter Genauigkeit, was der Grund für die Untergrenze der Anzeige bei Pikosekunden ist; bei der Ankunft sind es 6.970 Jahre Vorsprung. Die Eigengeschwindigkeit $\gamma\beta c$ wird in der Geschwindigkeitsanzeige dargestellt: Bei der Schubumkehr legt das Schiff pro Bordsekunde 7,23 AE auf der Karte der Galaxis zurück. Die Navigationsanzeige zeigt die an Bord gemessene Reststrecke (die Entfernung im Bezugssystem der Erde geteilt durch γ) und wie stark die Kontraktion den Weg bereits verkürzt hat; geteilt durch γ_F wäre die gesamte Route 1,94 Lichtjahre lang.

3.2 Bezugssysteme der Uhren

In den Instrumenten erscheinen drei Zeiten, die man nicht verwechseln sollte. τ ist die Eigenzeit des Schiffs — die Borduhr. $t_{\oplus}$ ist die Koordinatenzeit des Inertialsystems, in dem die Erde ruht, die „Erdzeit“ des Modells; $t_{\oplus} - \tau$ ist der akkumulierte Vorsprung dieser Uhr gegenüber der Borduhr, aber nichts, was die Heckkamera zeigen könnte: Das ankommende Bild wurde zu $t_{\oplus} - x/c$ ausgesandt, viel früher (Abschnitt 3.3), und die Gleichzeitigkeit des momentan mitbewegten Bezugssystems des Schiffs ist wieder eine andere Konstruktion, die in den Anzeigen nicht verwendet wird. Ebenso ist $\gamma\beta c$ eine Strecke im Bezugssystem der Erde pro Eigensekunde des Schiffs; lokal überschreitet nichts c . Die allgemeine Relativitätstheorie bleibt außerhalb des Modells: Die Erdschwerkraft geht beim Aufstieg als newtonsche Kraft ein, doch es gibt keine gravitative Korrektur der Uhren. Die Größenordnung des Weggelassenen ist gegenüber der angezeigten Genauigkeit nicht vernachlässigbar: Das Potential an der Erdoberfläche ($\Delta\Phi/c^2 \approx 7 \times 10^{-10}$) summiert sich in 6.987 Jahren auf ~ 150 s, das der Sonne bei 1 AE ($\approx 10^{-8}$) auf ~ 36 min — die sekundengenaue „Erdzeit“ hängt vom gewählten Bezugssystem und Potential ab [22].

3.3 Signalverzögerung und Beschleunigungshorizont

Die Verbindung zur Erde wird mit der am Startpunkt ruhenden Erde und geradlinig laufendem Licht behandelt (die Erdbahn, 8 Lichtminuten, wird gegenüber 6.985 Lichtjahren vernachlässigt). Mit $x = r - R_{\oplus}$ wurde das Bild der Erde, das im Zustand $(t_{\oplus}, x)$ am Schiff ankommt, zu $t_{\oplus} - x/c$ ausgesandt, und ein vom Schiff ausgesandtes Signal erreicht die Erde zu $t_{\oplus} + x/c$. Für jemanden, der aus der Ruhe mit g beschleunigt, existiert ein Horizont: Signale, die nach $t_{\oplus} = c/a = 0,9687$ Jahre am Ursprung ausgesandt werden, erreichen das Schiff nie, solange es beschleunigt [3]. Die Simulation erzwingt diese Tatsache nicht; sie ergibt sich aus (6): Bei der Schubumkehr wurde das von der Erde ankommende Licht nur 0,9686 Jahre nach dem Start ausgesandt und ist 3.492,5 Jahre alt; bei der Ankunft wurde es 1,937 Jahre nach dem Start ausgesandt.

Das Bild der Erde ist nicht nur alt, es läuft auch in Zeitlupe und rotverschoben ab, um den rückwärtigen Doppler-Faktor

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

der bei der Schubumkehr 1/7.213 beträgt: Eine Bordsekunde zeigt 1/7.213 Sekunde der Erde, und das Licht kommt 7.213-mal röter an. Die Sonne im Heck ist ein schwarzer Körper von 5.772 K, gesehen bei $T' = 5.772 e^{-\eta} = 0,80$ K bei der Schubumkehr — kälter als der kosmische Hintergrund —, und ein UKW-Sender auf 100 MHz käme bei 13,9 kHz an. Die Heckkamera zeigt Aussendedatum, Alter des Lichts und Zeitlupenfaktor, berechnet mit diesen Ausdrücken.

3.4 Kalender

Die Dauerzähler verwenden Jahre zu 365,25 Tagen (31.557.600 s) und Monate von einem Zwölftel Jahr; die Daten ergeben sich durch Addition von τ oder $t_{\oplus}$ zum Startzeitpunkt — in UTC festgelegt (19.10.2026 15:00:00 UTC, dargestellt als 12:00 UTC-3) — und werden in der lokalen Zeitzone des Besuchers formatiert; der Kalender des Logbuchs verwendet die Zeitzone von Brasília. Es gibt keine reale Kommunikation: Die Anzeige berechnet die Verzögerung, die ein Signal hätte; der Bordfunk ist für die Reise geschriebene Fiktion (Abschnitt 11).

4. Licht

4.1 Aberration

Jede im Bezugssystem der Galaxis ruhende Quelle wird vom Schiff in einer aberrierten Richtung gesehen. Ist θ der Winkel zwischen der Quelle und der Bewegungsrichtung im Bezugssystem der Galaxis und θ' der beobachtete Winkel, so lautet die exakte Beziehung

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

die „Halbwinkelformel“ [4]. Sie wird der üblichen Form $\cos \theta' = (\cos \theta + \beta)/(1 + \beta \cos \theta)$ vorgezogen, weil sie für $\beta \rightarrow 1$ stabil bleibt: $\tan(\theta/2)$ wird für die vordere Hemisphäre als $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$ und für die hintere als $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$ berechnet, ohne Auslöschung, und der Faktor $e^{-\eta}$ komprimiert die vordere Hemisphäre ($\theta < 90^\circ$) in einen Kegel mit dem Winkelradius $2 \cdot \text{atan}(e^{-\eta}) \approx 2e^{-\eta}$ um den Bug; die exakt rückwärtige Richtung bleibt hinten. Bei der Schubumkehr passt die vordere Hemisphäre in einen Kreis von $0,016^\circ$ Radius — was die Aberrationsanzeige „halber Himmel in einem Kreis von θ' “ nennt. Dieselbe Formel wird, invertiert, für den Nebel, die diffuse Milchstraße und die Erde verwendet: Der Strahl wird im Ruhesystem integriert und die Strahldichte am Ende transformiert.

4.2 Doppler-Effekt: Farbe und Helligkeit

Der Doppler-Faktor einer in Richtung θ' gesehenen Quelle ist $D = 1/[\gamma(1 - \beta \cos \theta')]$. Für $\gamma \sim 10^3$ verliert der Ausdruck $1 - \beta \cos \theta'$ nahe dem Bug Stellen — messbar in doppelter Genauigkeit und gravierend im float32 des Shaders, dessen Maschinenepsilon (6×10^{-8}) bei der Schubumkehr $1 - \beta$ übersteigt; die Implementierung verwendet die äquivalente Form

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

in der ε direkt aus der Rapidität gewonnen wird, ohne β von 1 abzuziehen (Abschnitt 10). Ein als schwarzer Körper der Temperatur T behandelter Stern erscheint als schwarzer Körper der Temperatur $T' = D \cdot T$; eine Emissionslinie der Wellenlänge λ erscheint bei $\lambda' = \lambda/D$; der Fluss einer Punktquelle skaliert mit D^2 und die Strahldichte einer ausgedehnten Quelle mit D^4 [5]. Für Sterne des HYG-Katalogs, die eine eigene Geschwindigkeit haben, wird der Doppler-Effekt des Sterns relativ zum Bezugssystem der Galaxis in denselben Logarithmus einbezogen. Aus diesen drei Regeln, auf jeden Stern angewandt, entsteht der

Sternbogen: Vorn werden die kühlen Sterne (3.000–4.000 K), um $D \sim 2\text{--}3$ verschoben, weiß und blau, die heißen verschwinden im Ultraviolett, und der Himmel hinten erlischt und rötet sich.

4.3 Spektren, Farben und Kataloge

Die Sternspektren sind schwarze Körper. Die Umrechnung von Temperatur in Farbe verwendet die CIE-1931-Farbabgleichsfunktionen in der analytischen Näherung von Wyman, Sloan und Shirley [6], numerisch mit dem Planckschen Strahlungsgesetz zwischen 360 und 830 nm integriert, und die Matrix XYZ→lineares sRGB; das Ergebnis ist der Anteil der bolometrischen Leistung, der auf jeden Kanal entfällt, tabelliert für 1.024 Temperaturen von $\log_{10}T = 0,5$ bis 9,5 und im Shader mit Interpolation abgetastet (ohne Farbstufen). Die Strahldichte eines Sterns der visuellen Leuchtkraft L_V in der Entfernung d ist L_V/d^2 in Einheiten von $L_\odot/(4\pi \text{ Lj}^2)$, wobei die Temperatur beim HYG aus dem Farbindex B–V geschätzt wird (Ballesteros 2012 [7]; B–V = 0,65, wenn er fehlt) und beim Gaia-Zusatz aus der Spektralklasse.

Der Katalog umfasst 299.858 Sterne: die 109.400 des HYG v4.1 [8], mit Positionen, Geschwindigkeiten und Epoche J2000, und 190.458, ausgewählt aus der für Celestia aufbereiteten Gaia-EDR3/Hipparcos/Tycho-Distribution [9] ($V < 9$ entlang der Route, $V < 9$ auf der Erde oder $V < 13$ innerhalb von 15° um das Ziel), nach HIP/HD dedupliziert. Die Positionen sind dreidimensional, sodass die Parallaxe entlang der Route geometrisch und nicht inszeniert ist. Beim HYG ist die angezeigte Position die retardierte: Durch Fixpunktiteration wird der Aussendezeitpunkt t_e bestimmt, zu dem das bei $p + v \cdot (t_e - \text{Epoche})$ ausgesandte Licht den Beobachter im laufenden Jahr erreicht, wobei die Lösung an der zur Katalogeпоche beobachteten Position verankert ist. Es gibt weder Szintillation noch Zodiakallicht noch Gravitationslinsen.

4.4 Interstellare Extinktion

Der Staub ist eine explizite achsensymmetrische Scheibe, mit der zwischen Beobachter und Quelle integrierten optischen Tiefe

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

wobei die Sonne 65 Lj von der Ebene entfernt ist; K entspricht 0,55 Magnituden pro tausend Lichtjahre in der Ebene. Das Integral hat entlang einer geraden Strecke eine geschlossene Form (Anhang A). Die Extinktion wird *differentiell* angewandt: Die Katalogmagnitude enthält bereits die Extinktion bis zur Erde, daher wird die optische Tiefe Erde–Stern abgezogen und die Schiff–Stern addiert, damit ein Stern seine gemessene Helligkeit behält, solange das Schiff nahe der Erde ist. Die spektrale Abhängigkeit verwendet die Faktoren $\exp(-\{-0,18; 0; 0,30\} \cdot \tau)$ in den Kanälen R, G und B. Das diffuse Leuchten der Milchstraße ist ein Scheibenmodell mit der Dichte $0,055 \cdot e^{-R/8500} \cdot e^{-|z|/700}$ (Lichtjahre), einem Spektrum von 5.000 K und dem galaktischen Zentrum in 26.670 Lj, integriert in 28 logarithmischen Schritten bis 72.000 Lj, mit demselben Staub; die Magellanschen Wolken, M31 und M33 sind Partikelwolken in angenäherter Form. Die Abfragen der dreidimensionalen Bayestar-Karte blieben während der Vorbereitung unbeantwortet, sodass keine reale Staubwolke dargestellt wird (Abschnitt 11).

4.5 Feste Belichtung, PSF und Umsetzung für den Bildschirm

Der Renderer arbeitet mit HDR: Der Fluss jedes Sterns wird in einem *Puffer* halber Genauigkeit in physikalischen Einheiten akkumuliert, mit einer einmal gewählten festen Verstärkung E ($E_{\text{dunkel}} = 5.400$ in der Referenzkalibrierung von 1.200 px/rad, skaliert mit $(\text{px/rad})^2$, damit die Helligkeit von der Auflösung unabhängig ist). Ein nicht aufgelöster Stern wird als kompakte Gaußfunktion gezeichnet, $\sigma = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{px/rad})$, ohne künstliche Leuchtscheibe; eine physische Scheibe erscheint erst, wenn der

aberrierte Winkelradius 1,2 px überschreitet. Die Umsetzung für den Bildschirm ist eine feste SDR-Kompression, weder ein simuliertes Auge noch eine automatische Belichtung:

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

wobei c die lineare Farbe ist, L ihre Leuchtdichte und $s(L)$ ein weicher Übergang zwischen 1,5 und 12, der von der Erhaltung des Farbtons zur kanalweisen Sättigung übergeht. Mit dieser Kalibrierung erscheint in Ruhe jeder Stern bis zur Magnitude 7, und die Darstellungsgrenze liegt im Bereich der Magnitude 8 — das Kriterium ist ein Pixel oberhalb einer festen Helligkeitsschwelle auf dem Bildschirm, überprüft durch eine CPU-Nachbildung des Shaders über den Katalog (Abschnitt 10). Nimmt man die Magnitude 8,0 als ungefähre Referenz und 6,5 als Referenz für die Beobachtung mit bloßem Auge an einem dunklen Himmel, entspricht der Unterschied Quellen mit etwa viermal weniger Fluss ($10^{0,4 \cdot 1,5} \approx 4$). Dieser Vergleich charakterisiert die gewählte Belichtung; er stellt keine Kalibrierung des menschlichen Sehens dar. Die Zählungen — rund 56.000 dargestellte Sterne am ganzen Himmel gegenüber ~9.000 mit bloßem Auge sichtbaren — beziehen sich auf den ganzen Himmel und messen keine Empfindlichkeit. Die Heckkamera verwendet dieselbe Verstärkung.

4.6 Erde, Atmosphäre und Startbasis

Die Erde wird als texturierte Kugel mit dem Komposit Blue Marble: Next Generation vom Januar 2004 (2.048×1.024) [20] und der Wolkendecke Blue Marble Clouds gezeichnet, Letztere mit kontinuierlichem prozeduralem Detail in zwei Kugelschalen (1,5–3,8 km und 8,5–9,3 km Höhe), damit die Annäherung der Kamera keine Pixel offenbart. Die Oberfläche empfängt das Sonnenlicht mit dem Terminator des Startzeitpunkts und einem atmosphärischen Halo aus Einfachstreuung; der von der Basis aus gesehene Taghimmel verdunkelt sich zwischen 50 und 100 km Höhe, aus visuellen Gründen, wobei der Erdrand beleuchtet bleibt. Die Basis ist Kulisse: Breite gleich der Deklination von M16 ($-13,88^\circ$, durch die Achse der Route vorgegeben), visuelle Länge fest bei $-39,02^\circ$, Kamera in 35 m, Turm von 112 m, prozedurale Küste und prozeduraler Fluss; die Details der Basis verschwinden bei 12 km und das Ensemble bei 90 km. Die angezeigte Ausrichtung der Erde dreht sich nicht (Abschnitt 11). Fällt der scheinbare Radius der Erde unter 1,2 px, wird sie zum Punkt, einem schwarzen Körper von 5.772 K mit der Leuchtkraft $1,36 \times 10^{-10} L_\odot$ und einer bläulichen Tönung, und ein Stern, der hinter der Scheibe liegt, wird von der Szenen-Erde verdeckt.

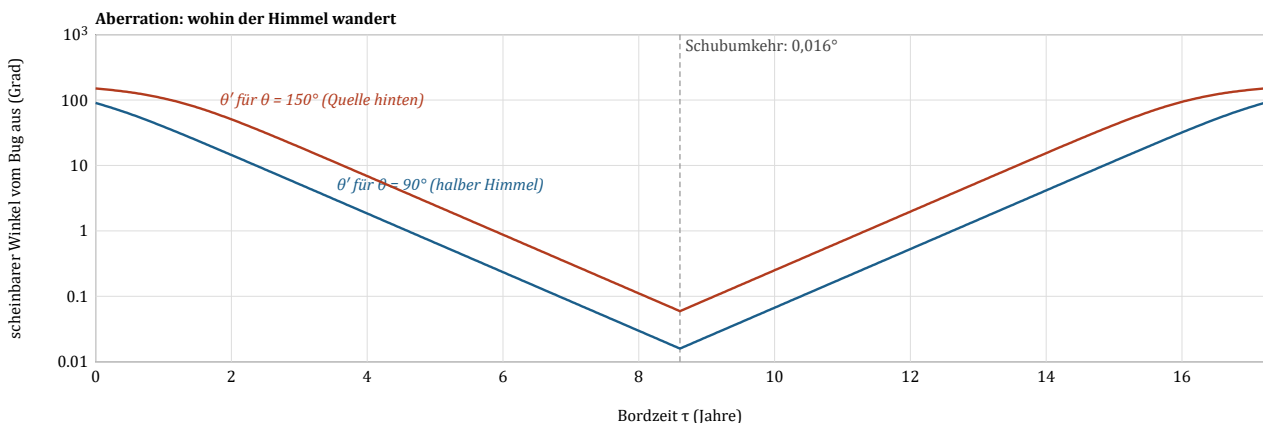


Abbildung 2. Scheinbarer Winkel, vom Bug aus gemessen, einer Quelle, die im Bezugssystem der Galaxis bei 90° liegt (Grenze des halben Himmels), und einer Quelle bei 150° , fast hinter dem Schiff, nach Gleichung (10): $\tan(\theta'/2) = e^{-\eta} \tan(\theta/2)$. Nach 1 Bordjahr passt der halbe Himmel bereits in 39° ; nach 3 Jahren in 7° ; bei der Schubumkehr in $0,016^\circ$ — und die Quelle hinten erscheint $0,06^\circ$ vom Bug entfernt.

5. Kosmischer Mikrowellenhintergrund

Der CMB ist ein schwarzer Körper bei $T_0 = 2,7255 \text{ K}$ [10] in dem Bezugssystem, in dem er isotrop ist. Für einen bewegten Beobachter zeigt jede Richtung weiterhin ein Schwarzkörperspektrum, mit der Temperatur

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

wobei θ von der Bewegungsrichtung aus gemessen wird [11]. Das Schiff startet vom Sonnensystem, das sich bereits mit $369,82 \text{ km/s}$ in Richtung $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$ relativ zum CMB bewegt [10]; der Boost des Schiffs wird mit diesem Dipol zusammengesetzt: Achse und effektive Rapidität des vom Schiff aus gesehenen CMB-Bezugssystems ergeben sich durch Zusammensetzung der beiden Geschwindigkeiten, wobei $\gamma - |\gamma\beta|$ sorgfältig als $e^{-\eta}$ berechnet wird, um Auslöschung zu vermeiden. Die Temperatur in einer Richtung d ist dann $T_0/(e^{-\eta_{\text{eff}}} + \frac{1}{2}|\gamma\beta|_{\text{eff}}|d - \text{Achse}|^2)$, wobei $|d - \text{Achse}|^2 = 2(1 - \cos \theta)$ im Apex stabil ist. Am Bug ist bei der Schubumkehr $T = 19.652 \text{ K}$.

Die Strahldichte jeder Richtung ist das im Sichtbaren mit den CIE-Funktionen integrierte Plancksche Strahlungsgesetz, tabelliert für 2.048 Temperaturen von 300 bis 50.000 K in logarithmischer Skala. Der optische Fleck wird über die Fläche jedes Pixels mit 4-Punkt-Gauß-Quadratur und adaptiver Unterteilung (bis zu sechs Stufen) des Kerns integriert, dessen Winkelbreite $\sim 2e^{-\eta}$ rad unabhängig von der Auflösung mit dem Pixel verglichen wird; so behält ein Apex, der kleiner als ein Pixel ist, seine Energie, wenn er die Grenze zwischen Pixeln überquert oder die Auflösung wechselt. Unterhalb einer Spitzentemperatur von 300 K liegt der sichtbare Ausläufer unter $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, und der Fleck wird nicht berechnet. Das Ergebnis wird vor der Kompression (13) in 32-Bit-Gleitkomma addiert und vom Staub der Säulen, der im Ruhesystem des Staubs für Mikrowellen transparent ist, *nicht* abgeschwächt.

Die Bestrahlungsstärke auf einer zum Bug gerichteten Platte, $\int \sigma T(\theta)^4 / \pi \cdot \cos \theta \, d\Omega$ über die vordere Hemisphäre, wird in η mit logarithmischen Schritten in θ tabelliert (der heiße Kegel hat die Breite $\sim 1/\gamma$): Sie beträgt in Ruhe $\sigma T_0^4 = 3,1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ und strebt gegen $(16/3)\gamma^2 \sigma T_0^4$, die Komponente T^{0x} der transformierten Strahlung; bei der Schubumkehr beträgt sie 217 W/m^2 , und beide Grenzfälle werden im Test überprüft. Tabelle 2 gibt die Temperaturmeilensteine an; dieselbe Bestrahlungsstärke, umgerechnet mit dem sichtbaren Anteil des schwarzen Körpers, beleuchtet die Kabine (5,4% des sichtbaren Sonnenlichts bei der Schubumkehr).

Tabelle 2. Temperatur des kosmischen Hintergrunds am Bug im Verlauf der Reise.

Temperatur am Bug	Erstes Erreichen (Bordjahre)	Gesamtzeit oberhalb des Werts (Jahre)
300 K (Beginn der optischen Berechnung)	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 (Maximum, Schubumkehr)	8,61	—

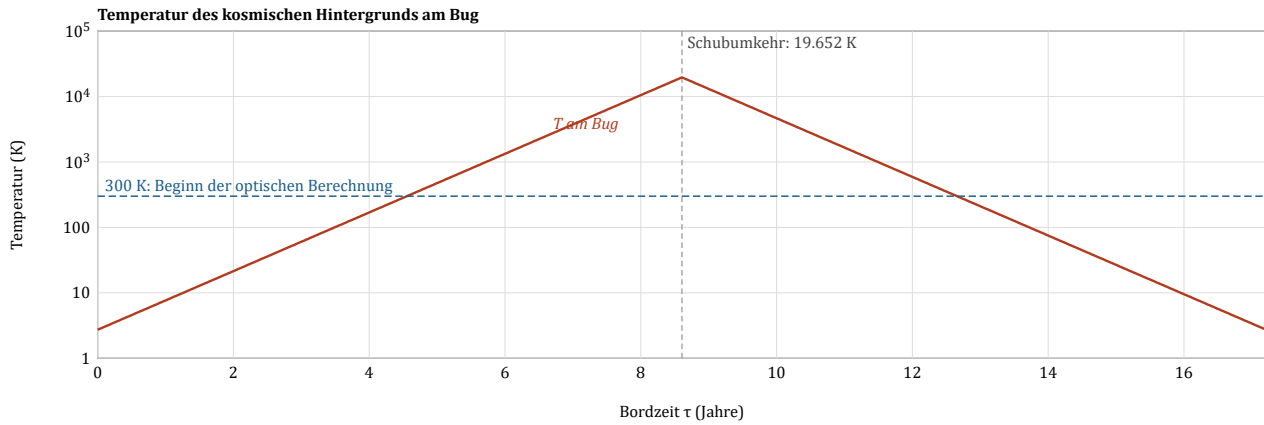


Abbildung 3. Schwarzkörpertemperatur des kosmischen Hintergrunds in Bugrichtung, $T = T_0 e^{\eta}$ (um den solaren Dipol korrigiert), nach Gleichung (14): Sie steigt alle 0,97 Bordjahre um einen Faktor e , überschreitet 300 K nach 4,55 Jahren — wenn die Berechnung des optischen Flecks beginnt — und erreicht 19.652 K bei der Schubumkehr, um in der Bremsphase symmetrisch abzufallen.

6. Adlernebel: Daten und Rekonstruktion

6.1 Daten

Die Geometrie in der Himmelsebene stammt aus zwei öffentlichen Fotografien [12, 13]: ESO0926a (Weitfeld von 32', Filter B, V und R, CC BY 4.0) liefert die Struktur des weiten Feldes; Hubble heic1501a (die Säulen, CC BY 4.0), durch Korrelation an der ersten registriert (Drehung um 35°), geht in die Strukturen unterhalb von 0,08 Lj ein. Die Richtungen der Sterne von NGC 6611 stammen aus SIMBAD und wurden auf Bogensekunden genau gegen das WCS des ESO-Bildes geprüft; Temperaturen (32.000–41.500 K) und Leuchtkräfte von acht Systemen stammen aus Tabelle 5 von Sana et al. [14], wobei nicht aufgelöste Doppelsterne als eine Quelle behandelt werden. Die Verhältnisse von fünfzehn optischen Linien relativ zu $H\beta$ ($H\alpha/H\beta = 4,343$) stammen aus dem mit MUSE gewonnenen Beispielspektrum von McLeod et al. [15], und die $H\alpha$ -Emissivität verwendet den Rekombinationskoeffizienten $3,56 \times 10^{-25} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}$, überprüft über die Beziehung zwischen Emissionsmaß und Rayleigh-Helligkeit. Die Tiefe stammt aus einem Referenz-Mesh für den 3D-Druck (NASA/STScI), um 1,725 skaliert, damit es mit der registrierten Silhouette übereinstimmt: Höhe der Säulen 8,625 Lj, Box von $6,39 \times 10,53 \times 9,81$ Lj, Gitter aus $142 \times 234 \times 218$ Zellen. Alle transversalen Abmessungen sind gemessene Winkel mal die angenommene Entfernung, 7.000 Lj zum Zentrum von M16 und 6.992 Lj zur Ebene der Säulen; die Tiefe ist angenommen (Abschnitt 6.2).

6.2 Transportmodell

Die für die Öffentlichkeitsarbeit vorgenommene Bildverstärkung der Fotografien wird durch ein Potenzgesetz mit dem Exponenten 2,4 (Annahme) rückgängig gemacht, und das resultierende Bild wird in eine Emissionshülle (weiches Maximum bei 0,7 Lj) und eine fotografische optische Tiefe bis $\tau_f = 4,5$ zerlegt, die über $\tau_v = \min[8, \tau_f(1 + 2,6 \tau_f)]$ in die vom Modell angenommene optische Tiefe umgerechnet wird — eine erklärte Regel, keine unabhängige Messung. Die Schichten sind Lagen mit Dicke: die Rekombinationsemission in einer Lage mit Zentrum 15 Lj hinter der Ebene der Säulen ($\sigma = 3$ Lj, Untergrenze 2%), die Bänder und die Mutterwolke bei 8,5 Lj ($\sigma = 2$ Lj), die Sterne des Haufens in einer gemeinsamen Ebene 3,2 Lj hinter der Ebene der Säulen. Licht, das vor einem Absorber gesehen wird, wird als Schleier behandelt, der in einer Schicht 0,1 bis 1,4 Lj vor ihm emittiert wird, mit dem Hintergrundspektrum. Die Streuung des Sternlichts verwendet eine Albedo von 0,5 und eine Henyey-Greenstein-Phasenfunktion mit $g = 0,6$; die Opazität ist $\kappa = 6 \text{ Lj}^{-1}$; das gestreute Kontinuum ist ein

schwarzer Körper von 37.755 K. Die absolute Helligkeit ist durch ein einziges Emissionsmaß festgelegt, $10^5 \text{ cm}^{-6} \cdot \text{Lj}$ ($\approx 100 \text{ e}^-/\text{cm}^3$ auf 10 Lj), ein plausibler Wert am oberen Rand.

Der Transport ist ein Raymarching im Ruhesystem des Nebels mit 224 Abtastpunkten (24 davor, 160 im feinen Intervall der Bänder und der Säulen, 40 dahinter): Linienemission, gestreutes Kontinuum und graue Absorption werden der Reihe nach entlang des Strahls integriert; die Strahldichte wird am Ende durch Doppler-Effekt und Aberration transformiert (die um λ/D verschobenen Linien verlassen beim Anflug das Sichtbare — $\text{H}\alpha$, bei 656 nm, liegt bei 77% von c bei 234 nm); der Renderdurchgang speichert neben der vormultiplizierten Strahldichte die Austrittstiefe (kodiert als $\log_2(1 + d)/34$, wie im Durchgang der Sterne) und die kumulative optische Tiefe an vier Punkten, sodass die Sterne hinter dem Material durch das abgeschwächt werden, was tatsächlich vor ihnen liegt. Der Detailgrad der Texturen wird nach dem Ruhewinkel pro scheinbarem Pixel gewählt, der mit dem Doppler-Faktor wächst: Der Nebel erhält nie mehr Winkeldetail, als die Fotoebene besitzt, und zeigt auch aus der Ferne kein Aliasing. Die angenommene Volumenverteilung ist durch die Beobachtungen nicht eindeutig bestimmt: Die Spektroskopie liefert Randbedingungen für Geschwindigkeiten, Elektronendichte, Extinktion und relative Geometrie der Säulen [15], legt aber das hier verwendete vollständige dreidimensionale Feld von Dichte und Emissivität nicht fest; Positionen und Dicken der Schichten, die gemeinsame Ebene der Sterne und die dem Mesh zugewiesene Tiefe sind dokumentierte Annahmen des Modells. Abschnitt 11 fasst zusammen, was in diesem Modell Annahme ist.

7. Antrieb, Energie und der Fluss auf den Schild

7.1 Photonenrakete

Angenommen wird eine perfekte Photonenrakete: Die gesamte Treibstoffmasse wird in kollimierte Strahlung entgegen der Schubrichtung umgewandelt. Für diesen Antrieb liefert die relativistische Raketengleichung $m(\tau) = m_{\text{fim}} e^{b_{\text{fim}} - b(\tau)}$, wobei b die durch den Schub akkumulierte Rapidity ist, (3): $b = b_1 + \eta - \eta_1$ in der Beschleunigung und $b = b_F + \eta_F - \eta$ in der Bremsphase, mit $b_F = b_1 + \eta_F - \eta_1$ und $b_1 = 2,83 \times 10^{-3}$, der Brenngröße des Aufstiegs. Mit der Trockenmasse $m_{\text{fim}} = 100 \text{ t}$:

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

was die Sonne in 1.221 s abstrahlt. Die Leistung des Strahls im momentanen Bezugssystem des Schiffs ist $P = m \cdot a_{\text{Schub}} \cdot c$. Zu Beginn des Starts, mit 1,1 g Schub, beträgt sie etwa $1,68 \times 10^{22} \text{ W}$; zum Vergleich: Die im Modell verwendete Referenz $P_{\text{ref}} = m g_0 c$ beträgt mit der Anfangsmasse $1,53 \times 10^{22} \text{ W}$. Während der Bremsphase bei 1 g sinkt die Leistung von $2,1 \times 10^{18} \text{ W}$ bei der Schubumkehr auf $2,9 \times 10^{14} \text{ W}$ unmittelbar vor dem Halt, wenn das Triebwerk abgeschaltet wird; in der Bremsphase zeigt der Strahl relativ zur Bewegung nach vorn. Der verbrauchte Treibstoffanteil ist $(1 - e^{-b})/(1 - e^{-b_{\text{fim}}})$, und die Reserve erreicht genau beim Halt null; die Systemanzeige zeigt die Reserve, und die vom Bordfunk verwendete Formatierung berechnet sie direkt, $e^{-b}(1 - e^{b - b_{\text{fim}}})/(1 - e^{-b_{\text{fim}}})$, um die letzten Stellen nicht durch Auslöschung zu verlieren, und setzt die beiden Prozentsätze in ganzzahliger Dezimalarithmetik zusammen (die Summe ergibt 100%, ohne die Reserve vor dem Ende auf null zu runden). Ein kollimierter Strahl ist im Vakuum ohne einen Streumechanismus von der Seite nicht sichtbar; im interstellaren Medium hinge sein Aussehen vom Spektrum des Strahls und von den Eigenschaften und der Verteilung von Gas und Staub ab. Diese Streuung wird vom Simulator nicht berechnet; deshalb wurde ihr visueller Beitrag weggelassen — es gibt weder Abgasfahnen noch Lichtblitze —, und die Bremsphase wird durch die Instrumente angezeigt.

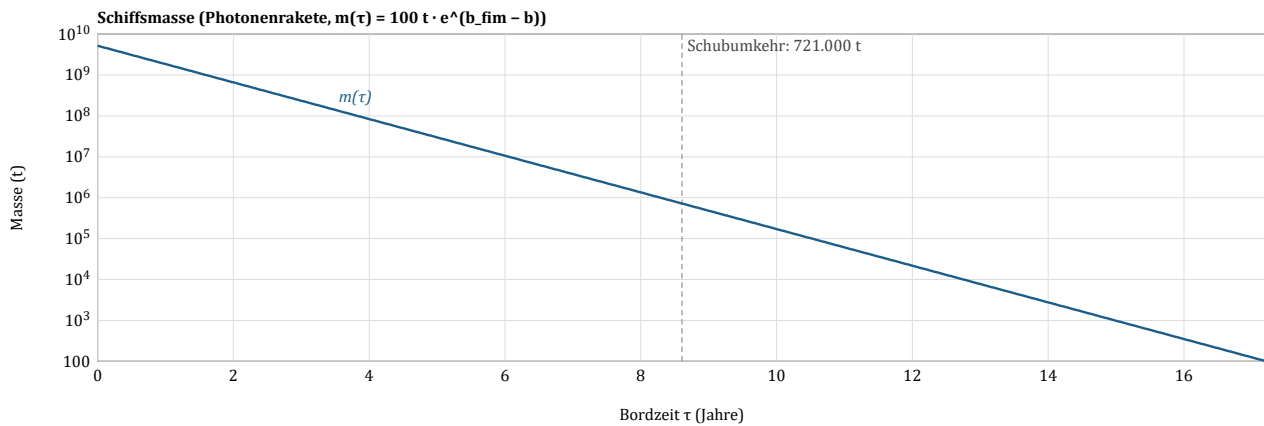


Abbildung 4. Gesamtmasse des Schiffs im Verlauf der Reise für die ideale Photonenrakete mit 100 t Trockenmasse: $5,20 \times 10^9$ t beim Start, $7,21 \times 10^5$ t bei der Schubumkehr und 100 t beim Halt; in logarithmischer Skala ist die Kurve in jedem Abschnitt eine Gerade, weil die Brenngröße b selbst die akkumulierte Rapidität ist.

7.2 Interstellares Medium und Schild

Das interstellare Gas trifft am Bug als Protonenstrahl mit der kinetischen Energie $(\gamma - 1)m_p c^2$ ein, mit der Dichte γn im Bezugssystem des Schiffs. Der Energiefluss auf eine zur Bewegung senkrechte Fläche ist

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

in der zweiten Form geschrieben, um $\gamma - 1$ bei niedriger Geschwindigkeit zu vermeiden. Mit $n = 0,1 \text{ cm}^{-3}$, der für die ganze Reise angenommenen Dichte der Lokalen Blase, ist $W = 5,9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ bei der Schubumkehr (3,4 TeV pro Proton), etwa das 930-Fache der spezifischen Ausstrahlung der Sonnenoberfläche; die Strahlungsgleichgewichtstemperatur einer Seite, $(W/\sigma)^{1/4}$, liegt bei $\sim 32.000 \text{ K}$. Der Block SCHILD der Systemanzeige zeigt diese Größen und setzt einen Schild voraus, der ihnen standhält. Semyonov [16, 17] zeigt, dass das aufgenommene Gas bei einem relativistischen Flug die dominierende Strahlungsquelle ist, noch vor der kosmischen Strahlung, und eine reale Abschirmung erfordert; die Simulation modelliert weder Dosis noch Erosion durch Staub noch Sekundärstrahlung (Abschnitt 11).

8. Inszenierte Begegnungen

8.1 Positionen und Geschwindigkeiten

Auf einer Geraden von der Erde nach M16 käme das Schiff an keinem Körper des Sonnensystems nahe vorbei. Damit die Reise in den ersten Tagen etwas zu zeigen hat, werden Mond, Mars, Ceres, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto an den Punkt gesetzt, an dem das Schiff den mittleren Bahnradius des jeweiligen Körpers kreuzt, auf abwechselnden Seiten der Route, in 1,5 Radien Abstand vom Zentrum (Saturn bei 1,55 R und 0,18 R über der Ringebene; Uranus bei 1,5 R, durch die Lücke zwischen dem ersten und dem zweiten Band, mit mehr als 300 km Spielraum); die Jupitermonde haben reale Radien (1.821, 1.560 und 2.634 km) an festen Positionen, Charon (606 km) befindet sich bei (9.000; 5.000; 12.000) km von Pluto — 15.800 km, etwa 20% weniger als der reale Abstand von $\sim 19.600 \text{ km}$ —, und der Asteroidengürtel wird durch zwanzig Felsbrocken von 20–92 km dargestellt. Der Zeitpunkt jedes Vorbeiflugs ist der physikalische Meilenstein des Bahnradius (Anhang B), und die Geschwindigkeit ist die der Trajektorie: Die Verschiebung pro Bild beträgt $\gamma \beta c \cdot \Delta \tau$ — der Monddurchmesser wird in 41 s bei 307.000 km/h durchquert; Pluto zieht mit 38,7 Millionen km/h vorbei, in 0,22 s. Es gibt weder Zeitlupe noch Swing-by noch Störung der Route.

8.2 Darstellung

Die Körper sind texturierte Kugeln (Solar System Scope, CC BY 4.0, mit Auffüllung nicht beobachteter Regionen; Pluto von New Horizons mit Lücken; Ceres fiktiv), beleuchtet aus einer festen Richtung, $\text{normalize}(-0,48; 0,65; -0,90)$, und nicht von der Sonne — die angezeigte Phase ist nicht die reale. Die Aberration wird auf Position und Winkelgröße jedes Körpers angewandt, doch es gibt weder Doppler-Farbverschiebung noch D^4 -Verstärkung auf den Texturen: Bei den Planetenvorbeiflügen ist $\beta \leq 0,036$, womit bis zu 3,7% Spektralverschiebung und bis zu 15,5% Strahldichtegewinn (D^4) für einen Körper voraus weggelassen werden; in der Oortschen Wolke ist $\beta = 0,25$, und der Faktor $D \approx 1,3$ würde die Strahldichte bereits fast verdreifachen. Die Saturnringe sind synthetisches Material mit den Bereichen C (1,275–1,58 R_S), B (1,58–2,018), Cassinische Teilung (2,018–2,10), A (2,10–2,349) und Encke-Teilung (2,291–2,297), mit $R_S = 58.232$ km in der Szene: In Kilometern liegen die Ränder bei 74.246 (C innen; NASA 74.658), 92.007 (C/B; 91.975), 117.512 (B außen; 117.507), 122.287 (A innen; 122.340) und 136.787 km (A außen; 136.780) — Abweichungen von bis zu 0,55%; synthetisch ist die Textur. Die Uranusringe sind sieben inszenierte Bänder, zentriert von 1,62 bis 2,07 R_U in Schritten von 0,075 R_U , mit Breiten von 400 bis 1.500 km, zur Sichtbarkeit verbreitert: Die realen Ringe sind 1 bis 10 km breit (der ϵ -Ring 20 bis 100 km). Sie haben Transparenz und Schatten, aber kein Eigenleuchten.

8.3 Oortsche Wolke und Lokale Blase

Ab 2.000 AE von der Sonne (Bordtag 90,2, $\beta = 0,25$) zeigt ein Abschnitt von 24 Bordstunden neun Gruppen aus je drei eisigen Körpern von 35 bis 125 km mit Mondtextur, die zwischen 00:00 und 23:52 Uhr Bordzeit in bis zu 4.500 km Abstand am Schiff vorbeiziehen; das Ende des Tages beendet nur die Sequenz — das Modell setzt den Austritt aus der Wolke bei 100.000 AE an, am Tag 574. Die reale Wolke ist erschlossen, nicht beobachtet; Körper von mehr als 1 km liegen Dutzende AE voneinander entfernt, und die Wahrscheinlichkeit, in 24 Stunden in 10.000 Kilometern Abstand an einem von ihnen vorbeizukommen, ist praktisch null. Die „Wand“ aus Filamenten der Lokalen Blase ist ein gaußförmiger Übergang ($\sigma = 0,003$ Lj) bei 300 Lj, in Bildschirmkoordinaten mit fraktalem Rauschen ohne Doppler-Effekt und Aberration gezeichnet; die reale Blase ist heißes Gas, im Optischen unsichtbar und ohne scharfe Grenze, und bei 300 Lj hat das Schiff bereits $\gamma \approx 310$. Heliosphärische Meilensteine (Terminationsschock bei 90 AE, Heliopause bei 120 AE, Voyager 1 bei 165 AE plus 3,57 AE/Jahr seit 2025, Kuipergürtel bei 40 AE) sind gerundete Werte, gemessen als Entfernung zur Sonne.

9. Instrumente, Logbuch und Bordfunk

9.1 Anzeigen

Alle Anzeigen sind reine Funktionen des Zustands (Abschnitt 2.3), formatiert in Modulen ohne Zugriff auf das Dokument und in Node getestet. Die Geschwindigkeitsanzeige zeigt die Geschwindigkeit in km/h, den Bruchteil von c mit mindestens zwei signifikanten Stellen der Differenz zu 100% (99,9999962% bei der Schubumkehr), die Eigengeschwindigkeit $\gamma\beta c$ in dynamischen Einheiten (km, Tausend km, Millionen km, AE pro Bordsekunde) und das *Rapiditätsband*: Da η an jedem Bordtag mit derselben Rate wächst, bewegt sich das Schiff mit konstantem Schritt über das Band, und die Marken für 50%, 90%, 99%, ... 99,99999% von c , bei $\eta = \frac{1}{2} \ln((2 - \epsilon)/\epsilon)$, liegen nahezu äquidistant. Die Zeitanzeige zeigt den Vorsprung der Erde, $t_{\oplus} - \tau$, auf einer Hintergrundskala mit 1-2-5-Teilung und dynamischer Einheit ab Pikosekunden (darunter liegt die Differenz in den ersten Sekunden unter der Auflösung der Integration) sowie den Faktor γ in logarithmischer Skala; die Masse, ebenfalls in logarithmischer Skala, befindet sich in der Anzeige „Masse und Treibstoff“, neben der Reserve. Die Navigationskarte hat einen Zyklus von 64 s: 10 s in der Übersicht, 2 s Heranzoomen, 50 s in der Nahansicht und 2 s Rückkehr, wobei sich das Schiff während der Übergänge

weiter über die Skala bewegt. Die Übersicht bildet die Position vor der Schubumkehr durch $X = \frac{1}{2} \ln(1 + k u) / \ln(1 + k)$ ab, mit $u = (r - R_{\oplus}) / (r_F - R_{\oplus})$ und $k = 10^{12}$, und danach durch $X = 1 - \frac{1}{2} \ln(1 + k w) / \ln(1 + k)$, mit $w = (D - r) / (D - r_F)$, ausgewertet nach (8): Die Skala wechselt bei der Schubumkehr von zurückgelegter zu verbleibender Strecke, und sowohl die ersten Kilometer als auch die letzten Lichtjahre bleiben sichtbar; Erde und Pluto sind feste Referenzen des Sonnensystems, die nächste Begegnung ist hervorgehoben. Die Nahansicht zeigt zwei Meilensteine — den vorherigen und den nächsten, mit in der angezeigten Einheit gerundeten Entfernungen und Vorrang für Begegnungen — und, wenn der Meilenstein weit entfernt ist, eine gerundete absolute Referenz mit lokalen Inkrementen, damit die Bewegung wahrnehmbar bleibt; die unteren Ablesewerte unterscheiden sich zwischen den beiden Ansichten, und die an Bord gemessene Entfernung bis zum Halt ist die verbleibende Strecke geteilt durch γ . Die Strahlungsanzeige zeichnet λB_{λ} , normiert auf das eigene Maximum, für die Sonne im Heck und den CMB am Bug und vergleicht in einem Energieband die solare Bestrahlungsstärke $L_{\odot} / (4\pi d^2) \cdot D^2$ mit der Bestrahlungsstärke des CMB am Bug (Abschnitt 5): Der kosmische Hintergrund übertrifft die Sonne vor dem ersten Bordjahr; bei der Schubumkehr sind es 217 W/m^2 gegenüber $5,4 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2$ der Sonne im Heck — ein Faktor $\approx 4 \times 10^{23}$ — und bei der Ankunft, mit ruhendem Schiff, $\approx 5 \times 10^8$. Die Heckkamera zeigt die Erde oder die Sonne mit Aussenddatum, Alter des Lichts und Zeitlupenfaktor (9); Frontfenster und Heckkamera werden im Reiseflug mit 10 bzw. 5 Hz aktualisiert.

9.2 Kabinenlicht

Die Kabine ist ein einziges Bild mit drei berechneten Lichtschichten: ein zirkadianer Zyklus (Tag von 07 bis 19 Uhr, Nacht von 22 bis 05 Uhr mit 55% und warmer Tönung, Rampen dazwischen), multiplikativ; das durch das Fenster einfallende Licht, additiv — die Summe aus dem Tageslicht der Erde während des Aufstiegs ($0,15 \cdot e^{-h/8.500 \text{ m}}$) und der Bestrahlungsstärke des CMB, umgerechnet mit dem sichtbaren Anteil des schwarzen Körpers bei der Temperatur am Bug und normiert auf 550 W/m^2 , was 0,32% des sichtbaren Sonnenlichts nach 7 Jahren und 5,37% bei der Schubumkehr ergibt (eine Beleuchtungsnaheung: Die Temperatur des CMB variiert mit der Richtung, und der Koeffizient verwendet die am Bug); und eine Spiegelung im Glas, deren Opazität $0,09 \cdot \text{Stufe} / (1 + \text{Außenlicht} / 0,005)$ zurückgeht, wenn Licht von außen kommt. Das Herstellerschild und die Schatten der Kabine folgen diesen Schichten; es gibt keine kalibrierte Photometrie.

9.3 Logbuch und Bordfunk

Das Logbuch wird von Meilensteinmodulen erzeugt, die die Zustandsfunktion und einen Bisektionslöser erhalten: Jeder Meilenstein (Entkommen, Bahnen, 1 Lichttag, Heliopause, Oort, CMB-Temperaturen, Halbwinkel der Aberration, „+100 Jahre auf der Erde“, Referenzsterne wie Proxima, Sirius, Wega und Beteigeuze, Geschwindigkeitsschwellen, Schubumkehr, Ankunft) ist ein berechneter Zeitpunkt τ , nicht von Hand geschrieben, und 108 Kontextfakten begleiten die Meilensteine, mit im Code vermerkter Quelle. Der Bordfunk ist ein Nachrichtenticker mit 2.415 vorab geschriebenen Meldungen (241 ursprüngliche und 2.174 aus einer Erweiterung) in drei Stimmen — Borealis und zwei fiktive Angestellte, Frau Hoffmann aus der Abteilung Compliance und Vermögensschutz und Herr Schulze aus dem Bereich Betriebsunterstützung und Notfälle. Die Kommentare des Katalogs folgen einer redaktionellen Beschränkung auf Ziffern, mit Ausnahmen für „1 g“ und „24 h/24 Stunden“; der Parser bewahrt außerdem das genehmigte Motto des Schiffs. Ausgeschriebene Zahlen sind in administrativem Humor erlaubt, nicht aber, um physikalische Daten einzuführen. Die Werte der Meldungen stammen aus der Simulation; die redaktionelle Prüfung und die Tests stellen sicher, dass die Kommentare weder Messwerte noch Pannen erfinden noch den Meilensteinen widersprechen. Die Verteilung ist deterministisch: Jede Meldung hat eine Flugphase und ein Thema, wird über den vorherigen oder nächsten Meilenstein und über Näherungsfenster ausgewählt, wiederholt sich nicht vor 15 min (Verlauf der letzten 24), und Antworten von Figuren verfallen nach 5 min

oder beim Phasenwechsel; veraltete Meldungen werden verworfen. Es gibt keine Textgenerierung durch KI in Echtzeit.

10. Implementierung und numerische Robustheit

10.1 Architektur

Die Anwendung ist statisch: HTML, CSS, JavaScript (ES-Module) und WebGL2, ohne Laufzeitbibliotheken. Die Zustandsfunktion (Abschnitt 2) ist rein und deterministisch; die Bildschleife liest die Uhr, berechnet den Zustand und aktualisiert Anzeigen, Himmel, Heckkamera und Bordfunk. Der Himmel verwendet einen HDR-Punktdurchgang (Sterne, mit gaußförmiger PSF und physischer Scheibe, wenn aufgelöst), einen Hintergrunddurchgang (diffuse Milchstraße, Erde, Atmosphäre), einen Volumendurchgang für den Nebel (halbe Auflösung, bis die Säulen mehr als 40 px einnehmen) und einen abschließenden Kompositionsdurchgang, der den CMB in 32 Bit addiert und (13) anwendet. Die Bildraten werden je nach Phase gewählt: 60 Hz bei nahen Vorbeiflügen, 30 Hz in den ersten beiden Tagen, 10 Hz im Reiseflug (5 Hz bei der Heckkamera), weil sich im Reiseflug auf der Zeitskala eines Bildes nichts ändert.

10.2 Stabile Formulierungen

Mehrere Größen der Reise weisen zwischen Start und Schubumkehr Verhältnisse in der Größenordnung 10^7 – 10^{19} auf, und die doppelte Genauigkeit ($2^{-52} \approx 2,2 \times 10^{-16}$) reicht für die naiven Formen nicht aus. Die getroffenen Entscheidungen:

- **Rapidität als Zustandsvariable.** η ist linear in τ (5); β , γ und $\varepsilon = 1 - \beta$ werden daraus abgeleitet: $\varepsilon = 2/(e^{2\eta} + 1)$ vermeidet die Auslöschung von $1 - \tanh \eta$ (die bei 10^{-16} sättigt) und stellt viel kleinere Werte dar, innerhalb der Grenzen der Gleitkommadarstellung. Bei der Schubumkehr ist $\varepsilon = 3,84 \times 10^{-8}$: Die Geschwindigkeit liegt 41,5 km/h unter c , und diese Zahl wird mit zwei signifikanten Stellen angezeigt.
- **Verbleibende Strecke.** $D - r$ würde die letzten Kilometer von $6,6 \times 10^{19}$ m verlieren (in dieser Größenordnung beträgt der Abstand zwischen benachbarten Doubles 8.192 m); die Bremsphase verwendet (8), das stetig gegen null geht, und die Routenkarte rechnet von dort aus in Kilometer um.
- **Differenzen hyperbolischer Funktionen.** (6) verwendet die Produkt-zu-Summe-Identitäten statt $\cosh \eta - \cosh \eta_1$, das zu Beginn der Phase 2 Stellen verlieren würde.
- **Doppler-Effekt und Aberration.** (10) und (11) bilden nie $1 - \beta \cos \theta$; der Winkel wird als $\tan(\theta/2)$ weitergeführt, mit den Zweigen $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$ und $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$; der Grenzfall $\tan(\theta'/2) > 10^{15}$ wird als $\theta' = \pi$ behandelt. Die Zusammensetzung mit dem solaren Dipol berechnet $\gamma - |\gamma\beta|$ als $e^{-\eta}$.
- **Treibstoff.** Anteile über $\exp m1/\exp$ und direkt berechnete Reserve; in der Formatierung des Bordfunks Prozentsätze in dezimalen Ganzzahlen (BigInt), damit 99,9...% und 0,0...1% zusammen 100% ergeben, ohne die Reserve auf null zu runden.
- **Kosmischer Hintergrund.** Strahldichte in logarithmischer Tabelle; Temperatur über $|d - \text{Achse}|^2$, stabil im Apex; Integration pro Pixel mit Flusserhaltung, Unterteilungskriterium in Winkleinheiten; Summe in 32 Bit außerhalb des *Puffers* halber Genauigkeit der Sterne, der auf 60.000 begrenzt ist, damit er nicht überläuft.
- **Tiefe.** Logarithmische Kodierung $\log_2(1 + d)/34$, mit d in Lichtjahren, gemeinsam für Sterne und Nebel: ein Bereich von vielen Größenordnungen im selben *Puffer* — darstellbarer Bereich, nicht Auflösung; in float32 verliert der Term $1 + d$ Inkremente unterhalb von $\sim 10^{-7}$ Lj.
- **Uhr.** Angleichung an den Server über HEAD (eine Schätzung, Abschnitt 3.1); T_0 und die Zeiten sind ganzzahlige Millisekunden; $\tau = t - T_0$ ist in doppelter Genauigkeit für $\sim 10^5$ Jahre exakt.

10.3 Verifikation

Das Repository enthält 128 automatisierte Tests in 19 Dateien (Node.js), die bei jeder Änderung ausgeführt werden, und zwei Prüfseiten im Browser (806 Prüfungen der Routenkarte und 2.804 der Funktexte). Zu den physikalischen Tests gehören: die Bestrahlungsstärke des CMB gegen ihre beiden analytischen Grenzfälle; die $H\alpha$ -Emissivität gegen die Beziehung Emissionsmaß–Rayleigh; der Halt mit $v = 0$ und vollständiger Brenngröße bei τ_{fim} ; die Geschwindigkeit bei den Vorbeiflügen (Verschiebung = $\gamma\beta c \cdot \Delta\tau$); die Stabilität des CMB nach einer simulierten Stunde und die Unabhängigkeit vom Verlauf; das Fehlen einer künstlichen Spitze im Heck; das Bild der Erde in der Heckkamera; und eine CPU-Nachbildung des Punkt-Shaders über die 109.400 Sterne des HYG, die die Grenzmagnitude in Ruhe festlegt (gruppiert nach dem ganzzahligen Teil der Magnitude: jeder Stern bis mag 7 sichtbar; 30–60% derer mit mag 8; keiner mit mag 9; 50.000–62.000 sichtbar am ganzen Himmel), die weiße Farbe des Sirius, die Zunahme der Sterne voraus nach 1 Bordjahr, das Überwiegen verschobener kühler Sterne nach 3 Jahren und den Ring von 1° mit 300–2.000 Sternen bei der Schubumkehr. Die Bereinigung der Version 1.0 wurde durch einen pixelgenauen Vergleich eines eingefrorenen Zustands überprüft (0,03% abweichende Pixel, nur Ziffern, die sich mit der Uhr ändern). Die Zahlen dieses Abschnitts beziehen sich auf Version 1.1.0 der Website vom 19.10.2026: Die Tests laufen mit `node --test check-*.mjs` im Ordner `hybrid/`, und die Prüfseiten werden im Browser geöffnet (`check-route.html`, `check-radio.html`); die Quellen der Daten und des Meshs, mit den Hashes der Dateien, stehen auf der Seite „Quellen und Danksagungen“. Diese Tests prüfen die interne Konsistenz mit dem Modell; sie sind keine Validierung durch Beobachtung — sie zu bestehen kalibriert weder die Fotografien noch beweist es, dass ein menschliches Auge diese Helligkeit sähe.

10.4 Veröffentlichung und Echtzeit

Die Website wird als statische Dateien veröffentlicht; die Veröffentlichung stempelt die Version, eine Build-Kennung und den Zeitpunkt $T_0 = 1792422000000$ ms (Unix-Epoche) ein, versiegelt: Jede spätere Veröffentlichung wiederholt dasselbe T_0 , und die während der Entwicklung verwendeten Zeitabkürzungen werden in der veröffentlichten Kopie ignoriert. Der Zeitpunkt ist für alle Besucher derselbe; der angezeigte Zustand ist die an der realen Uhr ausgewertete Zustandsfunktion.

11. Grenzen und bekannte Probleme

Die Vereinfachungen sind für die Öffentlichkeit auf der Seite „Dichterische Freiheit“ aufgeführt; hier sind sie nach Art geordnet, mit dem, was über ihre Größenordnung bekannt ist.

11.1 Eingestandene Unmöglichkeiten

- **Antrieb.** Es gibt keine perfekte Photonenrakete. Das Massenverhältnis $5,2 \times 10^7$ für 100 t gesamte Trockenmasse und die Leistung von $1,68 \times 10^{22}$ W beim Start liegen außerhalb jeder bekannten Technik. In einem vereinfachten Modell, in dem ein konstanter Anteil $1 - f$ der verlorenen Massenenergie in kollimierten Photonen abgestrahlt wird und der Rest im momentanen Bezugssystem des Schiffs isotrop entweicht, ist das Massenverhältnis $e^{b_{\text{fim}}/(1-f)}$: Als hypothetisches Beispiel erhöht ein Wirkungsgrad von 50% das Verhältnis von $5,2 \times 10^7$ auf $2,7 \times 10^{15}$ — dieser Prozentsatz stellt keinen allgemeingültigen Wirkungsgrad von Antimaterietriebwerken dar. Die Masse von Tanks, Radiatoren und Reserve ist null.
- **Schild und Besatzung.** Fluss von $5,9 \times 10^{10}$ W/m² ($n = 0,1$ cm⁻³) ohne Wirkung auf das Schiff; Dosis, Erosion durch Staubkörner, Sekundärstrahlung und Ionisation nicht modelliert; augenblickliche

Schubumkehr; ununterbrochen 1 g nach dem Aufstieg, in Beschleunigung und Bremsphase (null beim Halt); keine Lebenserhaltung.

- **Start.** Senkrechter Aufstieg ohne Atmosphäre, Luftwiderstand, Rotation (465 m/s) oder Bahnbewegung der Erde (29,8 km/s), ohne Parkbahn; ein Start aus einer Umlaufbahn in 400 km Höhe würde 0,008% des Treibstoffs und 41 min Bordzeit ändern. Die Aufstiegsrichtung ist die der Route, was M16 zum Zeitpunkt T_0 im Zenit der Basis erfordern würde; am Mittag des 19.10.2026 stand der Nebel auf dieser Länge $\sim 30^\circ$ hoch, und die feste visuelle Ausrichtung der Erde verbirgt den Unterschied.

11.2 Grenzen der Daten

- **Entfernung.** 7.000 Lj zum Zentrum von M16 ist der klassische Wert; die Gaia-DR2-Parallaxen ergeben 1.740 ± 130 pc $\approx 5.700 \pm 400$ Lj für NGC 6611 [18]. Der Unterschied ändert die Bordzeit wenig (17,2 $\rightarrow$ 16,8 Jahre, wegen des Logarithmus in (7)), ändert aber die Zeit auf der Erde um ~ 1.300 Jahre und skaliert alle Abmessungen des Nebels (Höhe der Säulen 8,6 $\rightarrow$ 7,0 Lj).
- **Nebel.** Die gesamte Tiefe ist Annahme: Lagen, gemeinsame Ebene der Sterne, Exponent der Bildverstärkung, Umrechnung $\tau_f \rightarrow \tau_v$, Albedo, g, κ , ein einziges Emissionsmaß; nur acht der ~ 500 Sterne des Haufens beleuchten das Gas; Linienspektrum eines einzigen Punktes, nur optisch; keine Mehrfachstreuung; der Nebel wird wie auf den Fotografien gezeigt — Licht, das ~ 6.992 Jahre vor 2026 ausgesandt wurde, bei der angenommenen Entfernung —, während das Schiff bei der Ankunft, 6.987 Erdjahre nach dem Start, Licht empfängt, das ~ 7 Jahre vor jenem Zeitpunkt ausgesandt wurde: Zwischen den beiden beobachteten Epochen liegen ~ 14.000 Jahre nicht modellierter Entwicklung. Nach der gemessenen Photoevaporationsrate [McLeod et al. [15]: $\sim 70 M_\odot/\text{Myr}$, Lebensdauer ~ 3 Myr] wäre die Veränderung gering. Die Vermutung einer jüngeren Supernova auf Grundlage von Spitzer-Daten [19] ist eine Hypothese der Öffentlichkeitsarbeit; die Hubble-Bilder von 1995 und 2014 [13] zeigen nur geringe Veränderungen an den Säulen.
- **Kataloge.** 299.858 Sterne gegenüber Milliarden realen; es fehlen die lichtschwachen und die fernen, insbesondere jene, die die Aberration nahe M16 ins Fenster brächte; der Gaia-Zusatz hat keine Geschwindigkeiten (er bleibt unbewegt) und wurde mit einer früheren Routenachse ausgewählt, die um $0,1^\circ$ von der aktuellen abweicht; Temperaturen aus Farbe oder Klasse, Spektren ohne Linien.
- **Staub.** Glattes Scheibenmodell (12), ohne die realen Wolken in Richtung Serpens/Aquila; diffuse Milchstraße und externe Galaxien synthetisch.
- **Bewegung von M16.** Keine Relativgeschwindigkeit Sonne-Haufen; die Größenordnung des Vernachlässigten beträgt 0,024 Lj in 7.000 Jahren pro km/s.

11.3 Szenische Entscheidungen

- **Begegnungen.** Planeten an der Kreuzung mit dem Bahnradius platziert, auf abwechselnden Seiten, in 1,5 Radian Abstand; Beleuchtung aus fester Richtung (keine reale Phase); weder Doppler-Farbverschiebung noch Strahldichtegewinn bei den Planeten (bis zu 3,7% in der Frequenz und 15,5% in der Strahldichte bei $\beta \leq 0,036$; in der Oortschen Wolke würden $\beta = 0,25$ und $D \approx 1,3$ die Helligkeit fast verdreifachen); Saturnringe synthetisch, mit Rändern bis zu 0,55% von den realen entfernt; Uranusringe mit Bändern von 400–1.500 km Breite gegenüber real 1–10 km; Jupitermonde fest; Charon $\sim 20\%$ näher an Pluto als in Wirklichkeit; zwanzig Felsbrocken als Gürtel; Oortsche Wolke mit neun erfundenen Gruppen in 24 h (reale Häufigkeit ≈ 0); „Wand“ der Lokalen Blase bei 300 Lj, künstlerisch.
- **Erde.** Blue-Marble-Karte von 2004 mit historischen Wolken; die angezeigte Erde dreht sich nicht (Meridian und Terminator von T_0); weder Wetter noch Jahreszeiten noch Stadtlichter.

- **Kabine und Wahrnehmung.** Ein einziges Bild mit Lichtschichten; weder Ton noch Vibration noch Gewicht; Kamera mit fester Belichtung, ohne Augenadaptation und ohne photometrische Kalibrierung des Monitors; die Spiegelung im Glas ist eine visuelle Ebene, keine optische Simulation.
- **Erzählung.** Das Schiff, die Basis, das Herstellerschild und der Bordfunk (2.415 Meldungen, fiktive Figuren, ohne erfundene Messwerte oder Pannen) sind Fiktion; das Unternehmen ist real.

11.4 Bekannte interne Inkonsistenzen

- Die Dichte des Mediums in der Schildberechnung beträgt auf der ganzen Reise $0,1 \text{ cm}^{-3}$, während die Abschätzung des gestreuten Leuchtens des Abgasstrahls 1 cm^{-3} auf der Route und 100 cm^{-3} im Hohlraum von M16 verwendet; innerhalb der Heliosphäre ist der Wert wieder ein anderer. Die Wärme am Schild variiert je nach Wahl um einen Faktor 10.
- Die Sonnenleuchtkraft erscheint als $3,83 \times 10^{26} \text{ W}$ in den Einheiten der Energieanzeige und als $3,828 \times 10^{26} \text{ W}$ bei den Meilensteinen (0,05%).
- Die Texte des Logbuchs nennen den Endpunkt „Ankunft an den Säulen“, während die Karte ihn Haltepunkt nennt, 6,9 Lj von der nächstgelegenen Seite entfernt.

11.5 Annahmen und Sensitivität des Modells

- Die Gleichgewichtstemperatur des Schildes verwendet Abstrahlung über eine Seite; bei zwei Seiten wäre sie um den Faktor $2^{-1/4}$ (16%) niedriger.
- Die invertierte fotografische Bildverstärkung (Exponent 2,4), der Faktor 1,725 des Meshs, die Obergrenze $\tau_v \leq 8$ und das Gitter von $142 \times 234 \times 218$ sind dokumentierte Konstruktionsentscheidungen, keine Messungen; sie zu ändern ändert das Aussehen des Nebels, ohne irgendwelchen Daten zu widersprechen.

12. Schlussfolgerung

Die Borealis Horizon zeigt, dass eine relativistische Reise der Öffentlichkeit mit den richtigen Zahlen, in Echtzeit, über 17 Jahre hinweg präsentiert werden kann, mit Code, der in einen Browser passt: Kinematik in geschlossener Form, Richtung für Richtung transformiertes Licht, ein aus dem Planckschen Strahlungsgesetz berechneter kosmischer Hintergrund und ein aus öffentlichen Beobachtungen konstruierter Nebel, alles unter fester Belichtung und mit dokumentierten visuellen Entscheidungen. Der Preis sind die erklärten Vereinfachungen — ein Antrieb und ein Schild, die es nicht gibt, eine Volumenverteilung des Nebels, die die Beobachtungen allein nicht bestimmen, Planeten, die dort platziert sind, wo sie gut aussehen —, und dieses Dokument macht sie ausdrücklich, mit der Größenordnung jeder einzelnen, damit der Leser genau weiß, was er sieht.

Literatur

- [1] Rindler, W. *Relativity: Special, General, and Cosmological*. 2. Aufl., Oxford University Press, 2006.
- [2] Møller, C. *The Theory of Relativity*. 2. Aufl., 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); die Halbwinkelform der Aberration folgt aus der Lorentz-Transformation der Richtungskosinus.
- [5] Peebles, P. J. E.; Wilkinson, D. T. "Comment on the anisotropy of the primeval fireball". *Physical Review* 174, 2168 (1968) — Strahldichte $\propto D^4$ und Invarianz von 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 für 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), Gl. 29.2: $T_0 = 2,7255$ K; Dipol 369,82 km/s in Richtung $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$. 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) und Pressemitteilung 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* (Januar 2004) und *Blue Marble Clouds*.
- [21] Solar System Scope. *Solar System Textures* (CC BY 4.0); NASA/JHUAPL/SwRI, Pluto-Karte (New Horizons).
- [22] Ashby, N. "Relativity in the Global Positioning System". *Living Reviews in Relativity* 6, 1 (2003).

Anhang A. Konstanten und Parameter

Symbol	Wert	Verwendung
c	299.792.458 m/s	exakt
g_0	9,80665 m/s ²	Eigenbeschleunigung im Reiseflug
Jahr	365,25 d = 31.557.600 s	Lichtjahr = $9,4607 \times 10^{15}$ m; Bordkalender
AE	$1,495978707 \times 10^{11}$ m	Eigengeschwindigkeit, Meilensteine
$R_{\oplus}$	6.371 km	$GM = g_0 R_{\oplus}^2$
T_0 (CMB)	2,7255 K	Monopol
solarer Dipol	369,82 km/s; (l, b) = (264,021°, 48,253°)	Zusammensetzung mit dem Boost des Schiffs
σ	$5,670374419 \times 10^{-8}$ W m ⁻² K ⁻⁴	Bestrahlungsstärke, Schild
$m_p c^2$	$1,50327759 \times 10^{-10}$ J (938,27 MeV)	Fluss auf den Schild
n	0,1 cm ⁻³	Dichte des Mediums (Schild)
m_{fim}	100 t	Trockenmasse
D, Entfernungen	7.000 Lj (Zentrum von M16); 6.992 Lj (Ebene der Säulen); 6.985 Lj (Halt)	Route
Richtung der Route	l = 16,890922°, b = 0,753177°	oberes Drittel der Säulen
Staub	K = $5,1 \times 10^{-4}$ Lj ⁻¹ ; H = 330 Lj; $z_{\odot} = 65$ Lj; Kanäle (-0,18; 0; 0,30)	Extinktion
Belichtung	$E_{\text{dunkel}} = 5.400$ bei 1.200 px/rad; $\sigma_{\text{PSF}} = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad})$	Himmel
Nebel	Skala 1,725; Lagen 15 Lj (σ 3), 8,5 Lj (σ 2), Sterne 3,2 Lj; $\tau_v = \tau_f \{1 + 2,6\tau_f\}$; Albedo 0,5; g = 0,6; $\kappa = 6 \text{ Lj}^{-1}$; 224 Abtastpunkte	Transport

Optische Tiefe von (12) entlang einer Strecke der Länge d zwischen den Höhen z_0 und z_1 (von der Ebene aus gemessen): $\tau = K d e^{-|z|/H}$, falls $|z_1 - z_0| < 10^{-3} d$, und andernfalls $\tau = (K d / \Delta z) [\text{sgn}(z_1) H (1 - e^{-|z_1|/H}) - \text{sgn}(z_0) H (1 - e^{-|z_0|/H})]$.

Anhang B. Meilensteine der Reise

Meilenstein	Bordzeit	Zustand
Entkommen aus der Erdschwerkraft ($v^2 = 2GM/r$)	44 min	Aufstieg mit 0,1–1 g netto
Mond (Bahnradius)	2,98 h	307.000 km/h; 41 s, um den Durchmesser zu durchqueren
Ende des Aufstiegs (Beginn der geschlossenen Form)	24 h	$34,9 \times 10^6$ km; 827 km/s
Mars · Ceres · Jupiter	2,19 · 3,27 · 4,59 d	inszenierte Vorbeiflüge in 1,5 Radian Abstand
Saturn · Uranus · Neptun · Pluto	6,25 · 8,87 · 11,1 · 12,7 d	Pluto mit $38,7 \times 10^6$ km/h
Oortsche Wolke (2.000 AE)	90,2 d	$\beta = 0,25$; Austritt laut Modell (100.000 AE) am Tag 574
Lokale Blase (300 Lj)	6,23 Jahre	$\gamma \approx 310$
CMB bei 1.000 K am Bug	5,72 Jahre	Tabelle 2
Schubumkehr	8,606 Jahre	$\gamma = 3.606$; 3.493 Jahre auf der Erde; 3.492,5 Lj
Halt	17,211 Jahre	6.985 Lj; 6.987 Jahre auf der Erde; $v = 0$; Treibstoff null

Borealis Dynamics · Borealis Horizon, Version 1.1.0 · Die Quellen und Lizenzen jeder Ressource stehen auf der Seite „Quellen und Danksagungen“ der Website; die Vereinfachungen unter „Dichterische Freiheit“; die Änderungen jeder Version unter „Versionen“. Die Website ist nicht kommerziell, bildungsorientiert und kostenlos.