

Borealis Horizon: Yaratılış Sütunları'na gerçek zamanlı görel bir yolculuk — model, uygulama ve sınırlar

Borealis Dynamics

Herkese açık deney: <https://ngc6611.pages.dev> · site sürümü 1.1.0 · kalkış 19 Ekim 2026, 12:00 (UTC-3) · belge tarihi 19.10.2026

ÖZET

Borealis Horizon, Dünya'dan Yaratılış Sütunları'na (M16) 7 ışık yılı uzaklıktaki bir noktaya 1 g'lik sabit öz ivmeyle yapılan ve Dünya referans sisteminde 6.985 ışık yılı kat eden yıldızlararası bir yolculuğun, tarayıcıda çalışan, herkese açık bir simülasyonudur. Simülasyon, yayın sırasında sabitlenen bir kalkış anından itibaren gerçek zamanlı ilerler: gözlemci, gemi zamanının her saniyesinde modelin öngördüğü kinematik durumu — tırmanışta sayısal integrasyonla, görel ivmelenme ve frenleme evrelerinde ise kapalı biçimli ifadelerle elde edilen — ve sabit pozlamalı bir kameranın kaydedeceği gökyüzünü görür. Bu makale fiziksel modeli (Runge-Kutta ile integre edilen Newtoncu bir başlangıç evresiyle birlikte kapalı biçimde hiperbolik hareket; zaman genişlemesi; sinyal gecikmesi ve ivme ufku; sapınç ile renk ve parlaklığın Doppler kayması; yıldızlararası sönümleme; yön yön dönüştürülen kozmik mikrodalga arka plan ışıınımı; Kartal Bulutsusu'nun kamuya açık fotoğraflardan üç boyutlu yeniden inşası; ideal foton roketi), uygulama tercihlerini ($\gamma \sim 10^4$ 'e kadar sayısal olarak kararlı formülasyonlar, önceden hesaplanmış tablolar, akıyı koruyan integrasyon, regresyon testleriyle doğrulama) ve bilinen sınırları belgelemektedir. İtki dönüşünde $\gamma = 3.606$, gemi zamanıyla 17,21 yıl ve Dünya'da 6.987 yıl ile yolculuk bir görselleştirme deneyi olarak sunulmaktadır: fiziğin hesaplanabildiği yerde sadık, mühendisliğin ya da verilerin bulunmadığı yerde ise açıkça basitleştirilmiş.

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.

Anahtar sözcükler: özel görelilik; hiperbolik hareket; sapınç; Doppler etkisi; kozmik mikrodalga arka plan ışıınımı; Kartal Bulutsusu; bilimsel görselleştirme; WebGL. **Keywords:** special relativity; hyperbolic motion; aberration; Doppler effect; cosmic microwave background; Eagle Nebula; scientific visualization; WebGL.

1. Giriş ve deney tasarımı

Sabit öz ivmeli yolculuklar, özel göreliliğin galaktik mesafeleri insan ölçeğindeki sürelerle nasıl dönüştürdüğünün klasik örneğidir: rapidite öz zamanla doğrusal olarak artar, kat edilen mesafe ise rapiditeyle üstel olarak büyür [1, 2]. Nadiren görülen ise bu yolculuğun *görünümüdür* — gökyüzünün ileriye doğru nasıl sıkıştığı, renklerin nasıl değiştiği, kozmik mikrodalga arka plan ışınlamının (CMB) nasıl görünür bir odağa dönüştüğü, Dünya'nın görüntüsünün geminin arkasında nasıl donup kaldığı — kestirmeye başvurmadan, doğru sayılarla ve yolculuğun gerçek süresi boyunca sunulmuş hâli.

Borealis Horizon bu deneydir. Gemi kurgusal bir kıyı üssünden kalkar, 1,1 g'lik itkiyle tırmanır, 1 g'lik sabit öz ivmeye geçer, yolun ortasında itkiyi tersine çevirir ve 6.985 ışık yılının ardından, Yaratılış Sütunları düzleminden 7 ışık yılı önce, Dünya'ya göre durgun hâlde durur. Simülasyon sıradan bir tarayıcıda çalışır (HTML, JavaScript ve WebGL2, harici kütüphane olmadan) ve kalkış anı, $T_0 = 19.10.2026\ 12:00:00\ \text{UTC}-3$, yayında damgalanmıştır: tüm ziyaretçiler aynı gemiyi, aynı noktada, gerçek zamanlı olarak görür. Zamanı hızlandırma, duraklatma ya da geri sarma yoktur; yolculuk, sitede gerçek zamanlı olarak akan 17,21 gemi yılı sürer.

Tasarım üç ilkeye dayanır. (i) *Hesabın olduğu yerde sadakat*: kinematik, saatler, ışık ve kozmik arka plan fizik yasalarından hesaplanır; sahne efekti yoktur. (ii) *Sabit pozlama*: pencerenin kazancı ve ton sıkıştırma işlevi önceden sabitlenir; sahneye göre otomatik pozlama ayarı yapılmaz. (iii) *Beyan edilmiş basitleştirme*: mühendisliğin yapamadığı (motor, kalkan) ve verilerin içermediği (bulutsunun üçüncü boyutu) şeyler açıkça üstlenilir ve sitenin "Şiirsel serbestlik" sayfasında kamuoyu için listelenir. Bu makale o listenin teknik karşılığıdır: modeli, formülleri, uygulamayı ve bilinen sorunları anlatır.

Bölüm 2 hareket modelini; Bölüm 3 zamanı ve sinyalleri; Bölüm 4 ışığı (sapınç, Doppler, sönümleme, kataloglar, pozlama, Dünya); Bölüm 5 kozmik arka planı; Bölüm 6 Kartal Bulutsusu'nun yeniden inşasını; Bölüm 7 itkiyi, enerjiyi ve kalkan üzerindeki akıyı; Bölüm 8 sahnelenmiş karşılaşmaları; Bölüm 9 göstergeleri, seyir defterini ve gemi telsizini; Bölüm 10 uygulamayı ve sayısal sağlamlığı; Bölüm 11 ise sınırlamaları ve bilinen sorunları sunar. Ekler sabitleri, parametreleri ve kilometre taşlarını bir araya getirir.

2. Hareket modeli

2.1 Tırmanış evresi ($\tau < 24\ \text{sa}$)

Yörünge, gemi zamanı τ 'nın (kalkıştan bu yana geçen saniye) saf bir fonksiyonudur ve iki evrede tanımlanır. Süresi bir gemi günü olarak sabitlenmiş ilk evrede gemi, Dünya yüzeyinden radyal olarak, Dünya kütleçekimi ve birim kütle başına şu itki altında tırmanır:

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

burada $GM = g_0 R_\oplus^2$ 'dir ($g_0 = 9,80665\ \text{m/s}^2$, $R_\oplus = 6.371\ \text{km}$); böylece itki rampada 1,1 g'dir ve $1,1\ \text{GM}/r^2$ değeri g_0 'ın altına düştüğünde, 311 km irtifada ($r = R_\oplus\sqrt{1,1}$), g_0 'a geçer. Bileşke ivme $a(r) - \text{GM}/r^2$ 'dir: başlangıçta net 0,1 g'dir ve Dünya kütleçekimi azaldıkça neredeyse 1 g'ye kadar artar. Bu evrede atmosfer, sürüklenme, Dünya'nın dönüşü, Güneş ya da Ay yoktur (Bölüm 11). Sistem

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

önceden belirlenmiş $h = 0,02 + 5 \times 10^{-4} \tau$ değişken adımıyla (yerde 20 ms'den günün sonunda 43 s'ye) dördüncü mertebeden Runge-Kutta yöntemiyle integre edilir ve τ , r , v ile ivme tabloları saklanır. Gün boyunca $v \ll c$ olduğundan (gün sonunda 827 km/s) evre Newtoncu olarak ele alınır; görelî düzeltme, durumla birlikte biriktirilen iki integralde devreye girer: *yakım* b (itkinin biriktirdiği rapidite, Bölüm 7),

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

her adımda Simpson kuralıyla integre edilir; ve Dünya zamanı $t_\oplus$, v^2/c^2 'de birinci mertebeden genişlemeyle,

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

adımın uçlarındaki v^2 ortalamasıyla değerlendirilir. Günün sonunda gemi Dünya'nın merkezinden 34,9 milyon kilometre uzaktadır, hızı 827 km/s'dir ve $t_\oplus - \tau = 0,107$ s'dir. Tablo düğümleri arasında durum, bilinen türevler (r için v , v için a) kullanılarak kübik Hermite polinomlarıyla interpolate edilir; bu da r 'nin, v 'nin ve raporlanan ivmenin sürekliliğini korur.

2.2 Görelî evre: kapalı biçimde hiperbolik hareket

$\tau_1 = 86.400$ s'den itibaren öz ivme sabittir, $a = g_0$, ve yörünge Rindler'in hiperbolik hareketidir [1, 3]. Rapidite η , $\beta = \tanh \eta$ ve $\gamma = \cosh \eta$ ile tanımlandığında sabit öz ivme şunu verir:

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

burada $\eta_1 = \operatorname{artanh}(v_1/c) = 2,76 \times 10^{-3}$, tırmanışın sonundaki rapiditedir. Radyal konum ve Dünya zamanı, $\tau_1 \leq \tau < \tau_F$ için şöyle ilerler:

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

bunlar, $\cosh \eta - \cosh \eta_1 = 2 \sinh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ ve $\sinh \eta - \sinh \eta_1 = 2 \cosh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ özdeşliklerinin, birbirine çok yakın iki sayının çıkarılmasına başvurmadan yazılmış hâlidir (Bölüm 10). İtke dönüşü, η_F 'den sıfıra simetrik frenlemenin varış noktasına, $D = 6.985$ ı.y., kalan mesafeyi tam olarak karşılayacağı η_F rapiditesinde gerçekleşir:

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

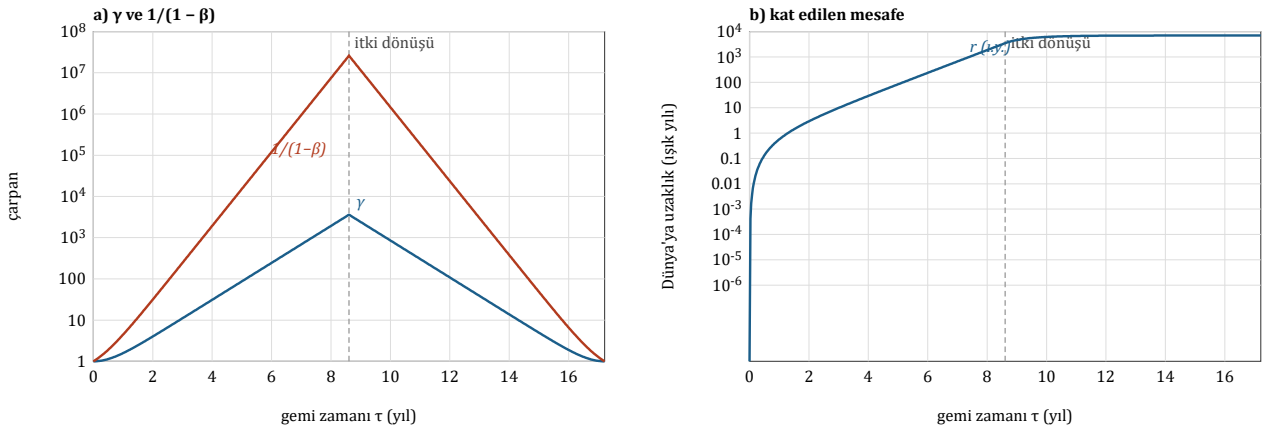
bu ifade $r(\eta_F) + (c^2/a)(\cosh \eta_F - 1) = D$ eşitliğinden elde edilir. Frenlemede ($\tau_F \leq \tau < \tau_{\text{fim}}$) rapidite doğrusal olarak azalır, $\eta = (\tau_{\text{fim}} - \tau) a/c$, ve kalan mesafe şudur:

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

Tablo 1 değerleri özetler. $c/a = 0,9687$ yıllık ölçek, yolculuğun doğal sabitidir: her 0,9687 gemi yılı rapiditeye bir birim ekler; ışık hızı kesrine eklenen her yeni "9", hız panelindeki rapidite şeridinin gösterdiği gibi, şeritte aynı uzunluğa mal olur.

Tablo 1. Yörünge'nin karakteristik değerleri ($a = g_0$, $D = 6.985$ ışık yılı).

Büyüklik	Değer	Açıklama
Tırmanışın sonu, τ_1	86.400 s	$r_1 = 3,49 \times 10^7$ km, $v_1 = 827$ km/s, $\eta_1 = 2,76 \times 10^{-3}$
İtke dönüşündeki rapidite, η_F	8,8836	$\gamma_F = 3.606,3$; $1 - \beta_F = 3,84 \times 10^{-8}$ (c'ye 41,5 km/h kalır)
İtke dönüşü, τ_F	8,6057 yıl	$t_{\oplus} = 3.493,47$ yıl; $r_F = 3.492,5$ ı.y.
Varış, τ_{fim}	17,2114 yıl	6.286,5 gemi günü; $t_{\oplus} = 6.986,94$ yıl
Azami öz hız, $\gamma\beta c$	7,23 AB/s	gemi saniyesi başına Galaksi haritasındaki mesafe
İtke dönüşünde büzülmüş yol, D/γ_F	1,94 ı.y.	gemide ölçülen rotanın tamamı
Toplam yakım, b_{fim}	17,7672	kütle oranı $e^b = 5,20 \times 10^7$ (Bölüm 7)



Şekil 1. Gemi zamanının fonksiyonu olarak yolculuğun kinematiki, (5)–(8) denklemlerinden: (a) Lorentz çarpanı $\gamma = \cosh \eta$ ve $1/(1 - \beta) = (e^{2\eta} + 1)/2$ itke dönüşüne kadar üstel olarak artar ($\gamma = 3.606$; $1 - \beta = 3,8 \times 10^{-8}$) ve frenlemede simetrik olarak azalır; (b) Dünya'ya uzaklık, ışık yılı cinsinden ve logaritmik ölçekte — gemi 1 ışık yılını gemi zamanıyla 1,29 yılda, yolun yarısını (3.492,5 ı.y.) ise itke dönüşünde geçer.

2.3 Anlık durum ve kilometre taşları

Herhangi bir τ için durum fonksiyonu evreyi, τ' 'yu, $t_{\oplus}'$ 'yi, r' 'yi, v' 'yi, η' 'yi, β' 'yi, γ' 'yi, $\varepsilon = 1 - \beta'$ 'yi, raporlanan ivmeyi ve yakımı döndürür. Bir mesafeyle ya da fiziksel bir büyüklükle tanımlanan kilometre taşları (Dünya kütleçekiminden kurtulma, gezegen yörüngeleri, 1 ışık günü, heliyopoz, Oort bulutu, Yerel Kabarcık, CMB sıcaklık eşikleri, referans yıldızların uzaklıkları) durum fonksiyonu üzerinde ikiye bölme yöntemiyle çözülür; en fazla 200 yinleme yapılır ve orta nokta çift duyarlılıkta uçlardan biriyle çakıştığında durulur; sabit süreli ve takvime bağlı kilometre taşları doğrudan oluşturulur. "Proxima Centauri'nin uzaklığı" gibi bir kilometre taşı, Dünya'dan itibaren bu yıldızın uzaklığına (4,25 ı.y.) erişmek demektir — onun yanından geçmek değil. Aynı durum tüm panelleri, seyir defterini, telsizi ve gökyüzünü besler: ikinci bir doğruluk kaynağı yoktur.

3. Zaman ve sinyaller

3.1 Saatler

Gemi saati, ziyaretçinin gerçek saatidir; bir HEAD isteğinin Date başlığıyla sunucu saatine hizalanır — bu bir hizalama tahminidir, garanti değildir: başlığın çözünürlüğü 1 s'dir, ağ asimetrik olabilir ve istek başarısız olursa yerel saat geçerli olur — ve $\tau = \tau_{şimdi} - T_0$ 'dır. "Dünya önde" paneli $t_{\oplus} - \tau$ 'yu dinamik birimle gösterir. Başlangıçta fark, (4) uyarınca $a^2\tau^3/(6c^2)$ olarak büyür: ilk saniyede 1,8 attosaniye, 1

pikosaniyeye ise ancak 82 s'de ulaşılır — bu, ilk saniyelerde çift duyarlıklı integrasyonun çözünürlüğünün altındadır ve panelin pikosaniyelik tabanının nedeni de budur; varışta öndelik 6.970 yıldır. Öz hız $\gamma\beta c$ hız panelinde gösterilir: itki dönüşünde gemi, her gemi saniyesinde Galaksi haritasında 7,23 AB ilerler. Seyrüsefer paneli, gemide ölçülen kalan mesafeyi (Dünya referans sistemindeki mesafenin γ 'ya bölümü) ve büzülmenin yolu ne kadar kısalttığını gösterir; γ_F 'ye bölündüğünde rotanın tamamı 1,94 ışık yılı olurdu.

3.2 Saatlerin referans sistemleri

Göstergelerde üç zaman görünür ve bunları birbirine karıştırmamak gerekir. τ geminin öz zamanıdır — gemi saati. $t_{\oplus}$, Dünya'nın durgun olduğu eylemsiz referans sisteminin koordinat zamanıdır, modelin "Dünya zamanı"dır; $t_{\oplus} - \tau$ bu saatin gemi saatine göre biriktirdiği öndeliktir, ama arka kameranın gösterebileceği bir şey değildir: gelen görüntü çok daha önce, $t_{\oplus} - x/c$ anında yayımlanmıştır (Bölüm 3.3); geminin anlık eşlik eden referans sistemindeki eşzamanlılık ise yine başka bir yapıdır ve panellerde kullanılmaz. Aynı şekilde $\gamma\beta c$, geminin öz saniyesi başına Dünya referans sisteminde alınan mesafedir; yerel olarak hiçbir şey c'yi aşmaz. Genel görelilik modelin dışında kalır: Dünya kütleçekimi tırmanışta Newtoncu bir kuvvet olarak hesaba girer, ama saatlere kütleçekimsel düzeltme uygulanmaz. Dışarıda bırakılan ölçeği, gösterilen duyarlılık karşısında ihmal edilebilir değildir: Dünya yüzeyindeki potansiyel ($\Delta\Phi/c^2 \approx 7 \times 10^{-10}$) 6.987 yılda ~ 150 s, Güneş'in 1 AB'deki potansiyeli ($\approx 10^{-8}$) ise ~ 36 dk biriktirir — saniyesine kadar "Dünya zamanı", seçilen referans sistemine ve potansiyele bağlıdır [22].

3.3 Sinyal gecikmesi ve ivme ufku

Dünya ile bağlantı, Dünya kalkış noktasında hareketsiz ve ışık doğrusal kabul edilerek ele alınır (Dünya'nın 8 ışık dakikalık yörüngesi, 6.985 ışık yılı karşısında ihmal edilir). $x = r - R_{\oplus}$ ile, $(t_{\oplus}, x)$ durumunda gemiye ulaşan Dünya görüntüsü $t_{\oplus} - x/c$ anında yayımlanmıştır; gemiden yayımlanan bir sinyal ise Dünya'ya $t_{\oplus} + x/c$ anında ulaşır. Durgun hâlden g ile ivmelenen biri için bir ufuk vardır: orijinden $t_{\oplus} = c/a = 0,9687$ yıldan sonra yayımlanan sinyaller, gemi ivmelendiği sürece ona asla ulaşmaz [3]. Simülasyon bu olguyu dayatmaz; olgu (6)'dan kendiliğinden ortaya çıkar: itki dönüşünde Dünya'dan gelen ışık kalkıştan yalnızca 0,9686 yıl sonra yayımlanmıştır ve 3.492,5 yaşındadır; varışta ise kalkıştan 1,937 yıl sonra yayımlanmıştır.

Dünya'nın görüntüsü eski olmasının yanı sıra arka Doppler çarpanı nedeniyle ağır çekimde akar ve kızıla kayar:

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

bu çarpan itki dönüşünde $1/7.213$ 'tür: bir gemi saniyesi, Dünya'nın bir saniyesinin $1/7.213$ 'ünü gösterir ve ışık 7.213 kat daha kırmızı ulaşır. Arkada kalan Güneş, itki dönüşünde $T' = 5.772 e^{-\eta} = 0,80$ K'de görülen 5.772 K'lik bir kara cisimdir — kozmik arka plandan daha soğuk — ve 100 MHz'lik bir FM istasyonu 13,9 kHz'te ulaşırdı. Arka kamera, bu ifadelerle hesaplanan yayım tarihini, ışığın yaşını ve ağır çekim çarpanını gösterir.

3.4 Takvim

Süre sayaçları 365,25 günlük yıllar (31.557.600 s) ve yılın on ikide biri uzunluğunda aylar kullanır; tarihler τ ya da $t_{\oplus}$ kalkış anına eklenerek elde edilir — kalkış anı UTC olarak sabitlenmiştir (19.10.2026 15:00:00 UTC, 12:00 UTC-3 olarak sunulur) — ve ziyaretçinin yerel saat diliminde biçimlendirilir; seyir defterinin takvimi Brasília saat dilimini kullanır. Gerçek bir iletişim yoktur: panel bir sinyalin sahip olacağı gecikmeyi hesaplar; gemi telsizi ise rota için yazılmış bir kurgudur (Bölüm 11).

4. Işık

4.1 Sapınç

Galaksi referans sisteminde durgun olan her kaynak, gemiden sapınca uğramış bir yönde görülür. θ , Galaksi referans sisteminde kaynak ile hareket yönü arasındaki açı ve θ' gözlenen açı olmak üzere, kesin bağıntı şudur:

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

yani "yarım açı formülü" [4]. Bu formül, $\beta \rightarrow 1$ olduğunda kararlı kaldığı için olağan $\cos \theta' = (\cos \theta + \beta)/(1 + \beta \cos \theta)$ biçimine tercih edilir: $\tan(\theta/2)$, ön yarıküre için $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$, arka yarıküre için $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$ olarak, basamak kaybı olmadan hesaplanır ve $e^{-\eta}$ çarpanı ön yarıküreyi ($\theta < 90^\circ$) pruvanın çevresinde açısal yarıçapı $2 \cdot \text{atan}(e^{-\eta}) \approx 2e^{-\eta}$ olan bir koniye sıkıştırır; tam arka yön arkada kalmayı sürdürür. İtki dönüşünde ön yarıküre $0,016^\circ$ yarıçaplı bir daireye sığar — sapınç panelinin "gökyüzünün yarısı θ' dairesinde" dediği şey. Aynı formül, ters çevrilerek, bulutsu, yaygın Samanyolu ve Dünya için de kullanılır: ışın durgun referans sisteminde integre edilir ve ışınım yoğunluğu en sonda dönüştürülür.

4.2 Doppler: renk ve parlaklık

θ' yönünde görülen bir kaynağın Doppler çarpanı $D = 1/[\gamma(1 - \beta \cos \theta')]$ 'dir. $\gamma \sim 10^3$ için $1 - \beta \cos \theta'$ ifadesi pruvaya yakın yerlerde basamak kaybeder — bu kayıp çift duyarlıkta ölçülebilir düzeydedir, makine epsilonu (6×10^{-8}) itki dönüşündeki $1 - \beta$ değerini aşan gölgelendiricinin float32 aritmetiğinde ise ağırdır; uygulama eşdeğer biçimi kullanır:

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

burada ε , β 'yı 1'den çıkarmadan doğrudan rapiditeden elde edilir (Bölüm 10). T sıcaklığında kara cisim olarak ele alınan bir yıldız, $T' = D \cdot T$ sıcaklığında bir kara cisim olarak görünür; λ dalga boyu bir salma çizgisi $\lambda' = \lambda/D$ 'de görünür; noktasal bir kaynağın akısı D^2 ile, genişlemiş bir kaynağın ışınım yoğunluğu ise D^4 ile ölçeklenir [5]. Kendi hızı bulunan HYG kataloğu yıldızları için, yıldızın Galaksi referans sistemine göre Doppler etkisi aynı logaritmaya katılır. Yıldız yayı, her yıldızla uygulanan bu üç kuraldan ortaya çıkar: önde, $D \sim 2-3$ ile kaydırılan soğuk yıldızlar (3.000–4.000 K) beyaza ve maviye döner, sıcak olanlar morötesinde kaybolur, arkadaki gökyüzü ise söner ve kızarır.

4.3 Tayflar, renkler ve kataloglar

Yıldız tayfları kara cisim tayflarıdır. Sıcaklıktan renge dönüşüm, Wyman, Sloan ve Shirley'nin analitik uyarlamasındaki [6] CIE 1931 renk eşleme işlevlerini kullanır; bunlar 360 ile 830 nm arasında Planck yasasıyla sayısal olarak integre edilir ve doğrusal XYZ→sRGB matrisinden geçirilir; sonuç, bolometrik gücün her kanala düşen kesridir; $\log_{10} T = 0,5$ 'ten 9,5'e kadar 1.024 sıcaklıkta tablolanır ve gölgelendiricide interpolasyonla örneklenir (renk basamakları olmadan). Görsel ısıtması L_V olan bir yıldızın d uzaklığındaki ışınım yoğunluğu, $L_\odot/(4\pi \text{ i.y.}^2)$ biriminde L_V/d^2 'dir; HYG sıcaklığı B–V renginden (Ballesteros 2012 [7]; eksik olduğunda B–V = 0,65), Gaia ekinin sıcaklığı ise tayf sınıfından kestirilir.

Katalogda 299.858 yıldız bulunur: konumları, hızları ve J2000 dönemiyle HYG v4.1'deki 109.400 yıldız [8] ve Celestia için hazırlanmış Gaia EDR3/Hipparcos/Tycho dağıtımından [9] seçilen 190.458 yıldız (rota boyunca $V < 9$, Dünya'da $V < 9$ ya da varış noktasına 15° içinde $V < 13$); yinelenenler HIP/HD numaralarına göre ayıklanmıştır. Konumlar üç boyutludur; dolayısıyla rota boyunca ıraklık açısı geometriktir, sahnelenmiş değildir. HYG için gösterilen konum gecikmeli konumdur: $p + v \cdot (t_e - \text{dönem})$ noktasından

yayımlanan ışığın gözlemciye içinde bulunulan yılda ulaşmasını sağlayan t_e yayım anı sabit nokta yinelemesiyle çözülür ve çözüm, katalog döneminde gözlenen konuma bağlanır. Işıldama, zodyak ışığı ya da kütleçekimsel mercekleme yoktur.

4.4 Yıldızlararası sönümleme

Toz, gözlemci ile kaynak arasında integre edilen bir optik derinliğe sahip, açıkça tanımlanmış eksenel simetrik bir disktrir:

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

Güneş düzleminden 65 ı.y. uzaktadır; K, düzlemde bin ışık yılı başına 0,55 kadire karşılık gelir. İntegralin doğrusal bir parça boyunca kapalı bir biçimi vardır (Ek A). Sönümleme *diferansiyel* olarak uygulanır: katalog kadiri Dünya'ya kadarki sönümlemeyi zaten içerdiğinden, Dünya-yıldız optik derinliği çıkarılır ve gemi-yıldız optik derinliği eklenir; böylece gemi Dünya'ya yakinken bir yıldız ölçülmüş parlaklığını korur. Tayfsal bağımlılık R, G ve B kanallarında $\exp(-\{-0,18; 0; 0,30\} \cdot \tau)$ çarpanlarını kullanır. Samanyolu'nun yaygın parıltısı, yoğunluğu $0,055 \cdot e^{-R/8500} \cdot e^{-|z|/700}$ (ışık yılı) olan, 5.000 K tayflı ve galaktik merkezi 26.670 ı.y.'de bulunan bir disk modelidir; aynı tozla birlikte 72.000 ı.y.'ye kadar 28 logaritmik adımda integre edilir; Macellan Bulutları, M31 ve M33 yaklaşık biçimleri verilmiş parçacık bulutlarıdır. Üç boyutlu Bayestar haritasına yapılan sorgular hazırlık sırasında yanıt vermedi; bu nedenle gerçek hiçbir toz bulutu temsil edilmemektedir (Bölüm 11).

4.5 Sabit pozlama, PSF ve ekrana dönüştürme

Görüntü oluşturu HDR'dir: her yıldızın akısı, fiziksel birimlerle, yarım duyarlıklılı bir *buffer*'da biriktirilir ve bir kez seçilen sabit bir E kazancı uygulanır (1.200 px/rad'lık referans kalibrasyonunda $E_{\text{karanlık}} = 5.400$; parlaklık çözünürlükten bağımsız olsun diye $(\text{px/rad})^2$ ile ölçeklenir). Çözümlememiş bir yıldız, yapay ışıklı disk olmadan, $\sigma = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{px/rad})$ olan sıkı bir Gauss olarak çizilir; fiziksel bir disk ancak sapınca uğramış açısal yarıçap 1,2 px'i aştığında görünür. Ekrana dönüştürme sabit bir SDR sıkıştırmasıdır; benzetimli bir göz ya da otomatik pozlama değildir:

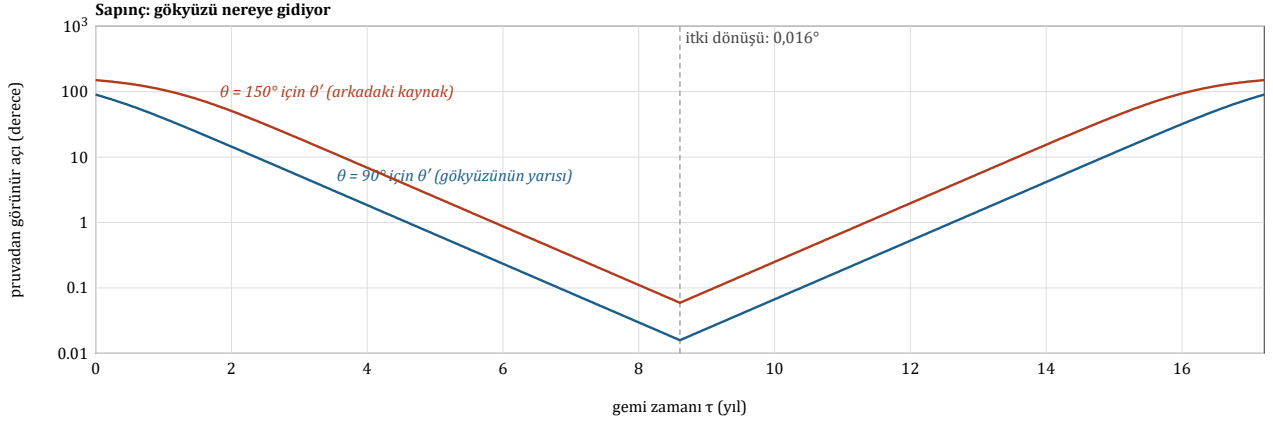
$$m = \text{mix} \left(\frac{c(1 - e^{-L})}{L}, 1 - e^{-c}, s(L) \right), \quad m' = 1,03 \frac{m^2}{m + 0,03}, \quad \text{çıkış} = m'^{1/2,2}, \quad (13)$$

burada c doğrusal renk, L onun ışıklılığı ve s(L), 1,5 ile 12 arasında tonu korumaktan kanal başına doyurmaya geçen yumuşak bir geçiştir. Bu kalibrasyonla, durgun hâlde 7 kadire kadar her yıldız görünür ve görüntüleme sınırı 8 kadir civarına düşer — ölçüt, ekranda sabit bir parlaklık eşliğinin üzerinde bir pikseldir ve gölgelendiricinin katalog üzerinde çalışan bir CPU kopyasıyla doğrulanmıştır (Bölüm 10). Yaklaşık referans olarak 8,0 kadir, karanlık gökyüzünde çıplak gözle gözlem referansı olarak 6,5 kadir alınır, fark yaklaşık dört kat daha az akıya sahip kaynaklara karşılık gelir ($10^{0,4 \cdot 1,5} \approx 4$). Bu karşılaştırma seçilen pozlamayı nitelendirir; insan görüşünün bir kalibrasyonu değildir. Sayımlar — tüm gökyüzünde görüntülenen yaklaşık 56.000 yıldıza karşı çıplak gözle görülebilen ~9.000 yıldız — tüm gökyüzüne aittir ve duyarlılık ölçmez. Arka kamera da aynı kazancı kullanır.

4.6 Dünya, atmosfer ve fırlatma üssü

Dünya, Ocak 2004 tarihli Blue Marble: Next Generation bileşimi (2.048×1.024) [20] ve Blue Marble Clouds bulut örtüsüyle dokulandırılmış bir küre olarak çizilir; bulut örtüsüne, kamera yaklaştığında pikseller açığa çıkmasını diye iki küresel katmanda (1,5–3,8 km ve 8,5–9,3 km irtifa) sürekli prosedürel ayrıntı eklenmiştir. Yüzey, kalkış anının gece-gündüz çizgisiyle Güneş ışığı alır ve tek saçılmalı bir atmosfer halesine sahiptir;

üsten görülen gündüz gökyüzü, görsel bir tercih olarak, 50 ile 100 km irtifa arasında kararır ve aydınlık kenar korunur. Üs bir dekordur: enlemi M16'nın dik açıklığına eşittir ($-13,88^\circ$, rota ekseninin dayattığı), görsel boyları $-39,02^\circ$ 'de sabittir, kamera 35 m'de, kule 112 m'dir, kıyı şeridi ve nehir prosedürelidir; üssün ayrıntıları 12 km'de, bütünü 90 km'de kaybolur. Gösterilen Dünya'nın yönelimi dönmez (Bölüm 11). Dünya 1,2 px'ten küçük bir görünür yarıçapa indiğinde bir noktaya dönüşür: ısıtması $1,36 \times 10^{-10} L_\odot$ olan, mavimsi tonlu, 5.772 K'lık bir kara cisim; diskinin arkasında kalan yıldız da sahnedeki Dünya tarafından örtülür.



Şekil 2. Galaksi referans sisteminde 90°'de (gökyüzünün yarısının sınırı) bulunan bir kaynağın ve geminin neredeyse arkasında, 150°'de bulunan bir kaynağın pruvadan ölçülen görünür açısı, (10) denkleminde: $\tan(\theta'/2) = e^{-\eta} \tan(\theta/2)$. Gemi zamanıyla 1 yılda gökyüzünün yarısı şimdiden 39° içine sığar; 3 yılda 7° içine; itki dönüşünde 0,016° içine — ve arkadaki kaynak pruvadan 0,06° uzakta görünür.

5. Kozmik mikrodalga arka plan ışıınımı

CMB, izotropik olduğu referans sisteminde $T_0 = 2,7255$ K [10] sıcaklığında bir kara cisimdir. Hareket eden bir gözlemci için her yön, sıcaklığı şu olan bir kara cisim tayfı göstermeyi sürdürür:

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

θ hareket yönünden ölçülür [11]. Gemi, CMB'ye göre zaten $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$ yönünde 369,82 km/s ile hareket eden Güneş Sistemi'nden yola çıkar [10]; geminin Lorentz itmesi (boost) bu dipolle birleştirilir: gemiden görülen CMB referans sisteminin eksen ve etkin rapiditesi iki hızın birleştirilmesiyle elde edilir; basamak kaybını önlemek için $\gamma - |\gamma\beta|$, $e^{-\eta}$ olarak hesaplanır. Bir d yönündeki sıcaklık bu durumda $T_0/(e^{-\eta_{\text{etk}}} + \frac{1}{2}|\gamma\beta|_{\text{etk}}|d - \text{eksen}|^2)$ olur; burada $|d - \text{eksen}|^2 = 2(1 - \cos \theta)$ tepe noktasında kararlıdır. Puvada, itki dönüşünde $T = 19.652$ K'dir.

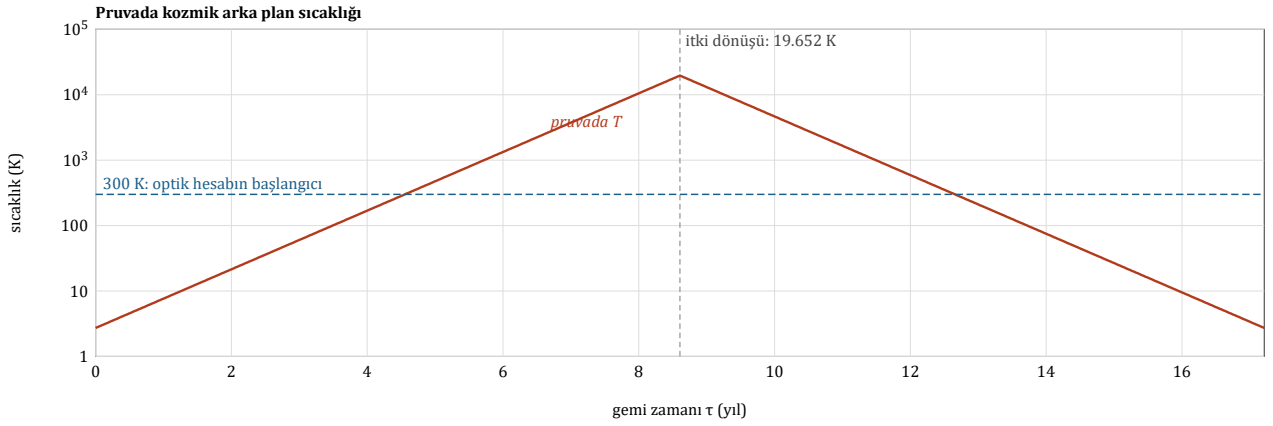
Her yönün ışıınım yoğunluğu, CIE işlevleriyle görünür bölgede integre edilen Planck yasasıdır ve 300 ile 50.000 K arasında logaritmik ölçekte 2.048 sıcaklıkta tablolanır. Optik leke, her pikselin alanı üzerinde 4 noktalı Gauss kuadraturü ve çekirdeğin uyarlamalı alt bölünmesiyle (en fazla altı düzey) integre edilir; çekirdeğin $\sim 2e^{-\eta}$ rad'lık açısal genişliği çözünürlükten bağımsız olarak pikselle karşılaştırılır; böylece bir pikselden küçük bir tepe noktası, pikseller arasındaki sınırı geçerken ya da çözünürlük değiştiğinde enerjisini korur. Tepe sıcaklığı 300 K'in altındayken görünür kuyruk $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 'den küçüktür ve leke hesaplanmaz. Sonuç, sıkıştırmadan (13) önce 32 bitlik kayan noktada toplanır ve Sütunlar'ın tozuyla sönümlenmez; bu toz, kendi referans sisteminde mikrodalgalarda saydamdır.

Pruvaya dönük bir levha üzerindeki ışıınım akısı, ön yarıküre üzerinden $\int \sigma T(\theta)^4 / \pi \cos \theta d\Omega$, θ 'da logaritmik adımlarla η 'ya göre tablolanır (sıcak koninin genişliği $\sim 1/\gamma$ 'dır): durgun hâlde $\sigma T_0^4 = 3,1 \times 10^{-6}$

W/m^2 'dir ve $(16/3)\gamma^2\sigma T_0^4$ 'e, yani dönüştürülmüş ışıının T^{0x} bileşenine yaklaşır; itki dönüşünde $217 W/m^2$ 'dir ve iki limit de testte doğrulanır. Tablo 2 sıcaklık kilometre taşlarını verir; aynı ışıının akışı, kara cismin görünür kesriyle dönüştürülerek kabini aydınlatır (itki dönüşünde görünür Güneş ışığının %5,4'ü).

Tablo 2. Yolculuk boyunca pruvadaki kozmik arka plan sıcaklığı.

Pruvadaki sıcaklık	İlk geçiş (gemi yılı)	Değerin üzerindeki toplam süre (yıl)
300 K (optik hesabın başlangıcı)	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 (tepe, itki dönüşü)	8,61	—



Şekil 3. Pruva yönündeki kozmik arka planın kara cisim sıcaklığı, $T = T_0e^\eta$ (Güneş dipolüne göre düzeltilmiş), (14) denkleminde: gemi zamanıyla her 0,97 yılda bir e çarpanı kadar artar, 4,55 yılda 300 K'i geçer — optik lekenin hesaplanmaya başladığı an — ve itki dönüşünde 19.652 K'e ulaşır; frenlemede simetrik olarak düşer.

6. Kartal Bulutsusu: veriler ve yeniden inşa

6.1 Veriler

Gökyüzü düzlemindeki geometri kamuya açık iki fotoğraftan gelir [12, 13]: ESO0926a (32'''lık geniş alan, B, V ve R süzgeçleri, CC BY 4.0) geniş alanın yapısını sağlar; ilkine korelasyonla karşılaştırılan (35° dönme) Hubble heic1501a (Sütunlar, CC BY 4.0) ise 0,08 ı.y.'den küçük yapıları katkıda bulunur. NGC 6611 yıldızlarının yönleri SIMBAD'dan alınmış ve ESO görüntüsünün WCS'sine karşı yay saniyesi düzeyinde denetlenmiştir; sekiz sistemin sıcaklıkları (32.000–41.500 K) ve ısıtmaları Sana ve ark.'nın [14] Tablo 5'inden alınmıştır; çözümlenmemiş çiftler tek kaynak olarak ele alınmıştır. On beş optik çizginin H β 'ya göre oranları (H α /H β = 4,343), McLeod ve ark.'nın [15] MUSE ile elde ettiği örnek tayftan gelir; H α salma gücü $3,56 \times 10^{-25} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}$ birleşme katsayısını kullanır ve salma ölçüsü ile Rayleigh parlaklığı arasındaki bağıntıyla denetlenmiştir. Derinlik, 3B baskı için hazırlanmış bir referans ağından (NASA/STScI) gelir; ağ, karşılaştırılmış silüetle örtüşmesi için 1,725 ile ölçeklenmiştir: Sütunlar'ın yüksekliği 8,625 ı.y., kutu $6,39 \times 10,53 \times 9,81$ ı.y., ızgara $142 \times 234 \times 218$ hücre. Tüm enine boyutlar, ölçülen açılarının benimsenen uzaklıkla — M16'nın merkezine 7.000 ı.y. ve Sütunlar düzlemine 6.992 ı.y. — çarpımıdır; derinlik varsayımdır (Bölüm 6.2).

6.2 Taşınım modeli

Fotoğraflardaki tanıtım amaçlı vurgulama, 2,4 üslü bir kuvvet yasasıyla (varsayım) geri alınır ve elde edilen görüntü bir salma zarfına (0,7 ı.y.'de yumuşak maksimum) ve $\tau_f = 4,5$ 'e kadar fotoğrafik bir optik derinliğe ayrıştırılır; bu derinlik, $\tau_v = \min[8, \tau_f(1 + 2,6 \tau_f)]$ ile modelin benimsediği optik derinliğe dönüştürülür — bağımsız bir ölçüm değil, beyan edilmiş bir kural. Katmanlar kalınlığı olan levhalardır: birleşme salması Sütunlar düzleminin 15 ı.y. gerisinde ortalanmış bir levhada ($\sigma = 3$ ı.y., %2 taban), şeritler ve ana bulut 8,5 ı.y.'de ($\sigma = 2$ ı.y.), küme yıldızları Sütunlar düzleminin 3,2 ı.y. gerisindeki ortak bir düzlemde. Bir soğurucunun üzerinde görülen ışık, onun 0,1 ile 1,4 ı.y. önündeki bir katmanda salınan bir peçe olarak, arka plan tayfıyla ele alınır. Yıldız ışığının saçılması 0,5 albedo ve $g = 0,6$ olan Henyey–Greenstein faz işlevini kullanır; opaklık $\kappa = 6$ ı.y.⁻¹'dir; saçılan süreklilik 37.755 K'lık bir kara cisimdir. Mutlak parlaklık tek bir salma ölçüsüyle sabitlenmiştir: 10^5 cm^{-6} ı.y. (10 ı.y.'de $\approx 100 \text{ e}^-/\text{cm}^3$), üst taraftan seçilmiş makul bir değer.

Taşınım, bulutsunun durgun referans sisteminde 224 örnekle yapılan bir ışın yürütmesidir (24'ü önde, 160'ı şeritlerin ve Sütunlar'ın ince aralığında, 40'ı arkada): çizgi salması, saçılan süreklilik ve gri soğurma ışın boyunca sırayla integre edilir; ışınım yoğunluğu en sonda Doppler ve sapınca dönüştürülür (λ/D ile kaydırılan çizgiler yaklaşırken görünür bölgeden çıkar — 656 nm'lik H α , c'nin %77'sinde 234 nm'dedir); geçiş, önceden çarpılmış ışınım yoğunluğunun yanı sıra çıkış derinliğini (yıldız geçişindekiyle aynı biçimde $\log_2(1 + d)/34$ olarak kodlanmış) ve dört noktadaki birikimli optik derinliği saklar; böylece malzemenin arkasındaki yıldızlar, gerçekten önlerinde bulunan şeyle sönümlenir. Dokuların ayrıntı düzeyi, Doppler çarpanıyla büyüyen, görünür piksel başına durgun açıya göre seçilir: bulutsu hiçbir zaman fotoğraf düzleminin sahip olduğundan daha fazla açısız ayrıntı kazanmaz, uzaktayken de tırtıklanmaz. Benimsenen hacimsel dağılım gözlemlerle tek başına belirlenmez: tayfölçüm, Sütunlar'ın hızları, elektron yoğunluğu, sönümlemesi ve görelî geometrisi hakkında kısıtlar sağlar [15], ama burada kullanılan tam üç boyutlu yoğunluk ve salma gücü alanını ortaya koymaz; katmanların konumları ve kalınlıkları, yıldızların ortak düzlemi ve ağa atanan derinlik, modelin belgelenmiş varsayımlarıdır. Bölüm 11, bu modelde neyin varsayım olduğunu özetler.

7. İtke, enerji ve kalkan üzerindeki akı

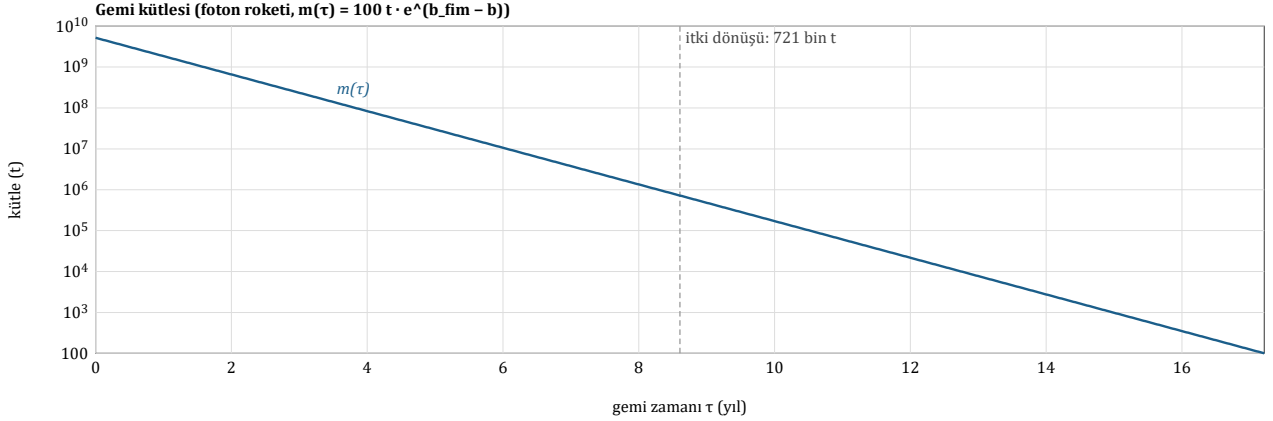
7.1 Foton roketi

Kusursuz bir foton roketi benimsenir: yakıt kütesinin tamamı, itkiye zıt yönde, paralel demetlenmiş ışınımaya dönüştürülür. Bu itici için görelî roket denklemi $m(\tau) = m_{\text{fim}} e^{b_{\text{fim}} - b(\tau)}$ sonucunu verir; burada b itkinin biriktirdiği rapiditedir, (3): ivmelenmede $b = b_1 + \eta - \eta_1$, frenlemede $b = b_F + \eta_F - \eta'$ 'dir; $b_F = b_1 + \eta_F - \eta_1$ ve $b_1 = 2,83 \times 10^{-3}$ tırmanışın yakımıdır. Kuru kütle $m_{\text{fim}} = 100 \text{ t}$ ile:

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

bu, Güneş'in 1.221 s'de yaydığı enerjidir. Demetin gücü, geminin anlık referans sisteminde $P = m \cdot a_{\text{itki}} \cdot c$ 'dir. Kalkışın başında, 1,1 g'lik itkiyle, yaklaşık $1,68 \times 10^{22} \text{ W}$ 'tır; karşılaştırma için, modelde benimsenen $P_{\text{ref}} = m g_0 c$ referansı başlangıç kütesiyle $1,53 \times 10^{22} \text{ W}$ 'tır. 1 g'lik frenleme sırasında güç, itki dönüşündeki $2,1 \times 10^{18} \text{ W}$ 'tan, motorun kapatıldığı duruştan hemen önce $2,9 \times 10^{14} \text{ W}$ 'a iner; frenlemede demet, harekete göre ileriye gösterir. Kullanılan yakıt kesri $(1 - e^{-b})/(1 - e^{-b_{\text{fim}}})$ 'dir ve yedek tam duruş anında sıfırlanır; sistemler paneli yedeği gösterir; gemi telsizinin kullandığı biçimlendirme ise son basamakları basamak kaybıyla yitirmemek için yedeği doğrudan, $e^{-b}(1 - e^{-b - b_{\text{fim}}})/(1 - e^{-b_{\text{fim}}})$ olarak hesaplar ve iki yüzdeyi tamsayı ondalık aritmetiğiyle oluşturur (toplam, yedeği sondan önce sıfıra yuvarlamadan %100'e kapanır). Paralel demetlenmiş bir ışın, bir saçılma mekanizması olmadan boşlukta yandan görülmez; yıldızlararası

ortamda görünümü, demetin tayfına ve gazın ve tozun özelliklerine ve dağılımına bağlı olurdu. Bu saçılma simülör tarafından hesaplanmaz; bu yüzden görsel katkısı dışarıda bırakılmıştır — sorgu ya da parlama yoktur — ve frenleme göstergelerle belirtilir.



Şekil 4. 100 t kuru kütleli ideal foton roketi için yolculuk boyunca geminin toplam kütlesi: kalkışta $5,20 \times 10^9$ t, itki dönüşünde $7,21 \times 10^5$ t ve duruşta 100 t; logaritmik ölçeğe eğri her bölümde bir doğrudur, çünkü yakım b birikmiş rapiditenin kendisidir.

7.2 Yıldızlararası ortam ve kalkan

Yıldızlararası gaz pruvaya, kinetik enerjisi $(\gamma - 1)m_p c^2$ olan bir proton demeti olarak, geminin referans sisteminde γn yoğunluğuyla ulaşır. Harekete dik bir yüzeydeki enerji akışı şudur:

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

bu ifade, düşük hızda $\gamma - 1$ 'den kaçınmak için ikinci biçimde yazılmıştır. Tüm yolculuk için benimsenen Yerel Kabarcık yoğunluğu $n = 0,1 \text{ cm}^{-3}$ ile, itki dönüşünde $W = 5,9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ 'dir (proton başına 3,4 TeV); bu, Güneş yüzeyinin yayma gücünün yaklaşık 930 katıdır; bir yüzün ışımsal denge sıcaklığı, $(W/\sigma)^{1/4}$, $\sim 32.000 \text{ K}$ 'dir. Sistemler panelindeki KALKAN bloğu bu büyüklükleri gösterir ve onlara dayanabilecek bir kalkan varsayar. Semyonov [16, 17], alınan gazın göreceli bir uçuşta kozmik ışınların da üzerinde baskın ışıyım kaynağı olduğunu ve gerçek bir zırhlama gerektirdiğini gösterir; simülasyon doz, toz aşındırması ya da ikincil ışıyım modellemez (Bölüm 11).

8. Sahnelenmiş karşılaşmalar

8.1 Konumlar ve hızlar

Dünya'dan M16'ya uzanan bir doğru üzerinde gemi, Güneş Sistemi'nin hiçbir cisminde yakın geçmezdi. Yolculuğun ilk günlerinde gösterecek bir şey olsun diye Ay, Mars, Ceres, Jüpiter, Satürn, Uranüs, Neptün ve Plüton, geminin her birinin ortalama yörünge yarıçapını kestiği noktaya, rotanın dönüşümlü taraflarına, merkezden 1,5 yarıçap uzağa yerleştirilir (Satürn 1,55 R'de ve halka düzleminin 0,18 R üzerinde; Uranüs 1,5 R'de, birinci ile ikinci şerit arasındaki açıklıktan, 300 km'den fazla payla); Jüpiter'in uyduları gerçek yarıçaplarına (1.821, 1.560 ve 2.634 km) sahiptir ve sabit konumlardadır, Charon (606 km) Plüton'dan (9.000; 5.000; 12.000) km uzaklıktadır — 15.800 km, yani $\sim 19.600 \text{ km}$ 'lik gerçek ayrıklıktan %20 kadar az — ve asteroit kuşağı 20–92 km'lik yirmi kayayla temsil edilir. Her geçişin anı, yörünge yarıçapının fiziksel kilometre taşıdır (Ek B) ve hız, yörüngedeki hızdır: kare başına yer değiştirme $\gamma \beta c \cdot \Delta \tau$ 'dur — Ay'ın çapı 307 bin km/h hızla 41 s'de geçilir; Plüton 38,7 milyon km/h hızla, 0,22 s'de geçilir. Ağır çekim, kütleçekimsel yardım ya da rotada sapma yoktur.

8.2 Temsil

Cisimler dokulu kürelerdir (Solar System Scope, CC BY 4.0, gözlenmemiş bölgeler için dolgularla; boşluklarıyla birlikte New Horizons'ın Plüton'u; kurgusal Ceres) ve Güneş tarafından değil, sabit bir yönden, normalize(-0,48; 0,65; -0,90), aydınlatılır — gösterilen evre gerçek değildir. Sapınç her cismin konumuna ve açısal boyutuna uygulanır, ama dokulara renkte Doppler kayması ya da D^4 kazancı uygulanmaz: gezegen geçişlerinde $\beta \leq 0,036'$ 'dır; bu, öndeki bir cisim için %3,7'ye varan tayfsal kaymayı ve %15,5'e varan ışıyım yoğunluğu kazancını (D^4) dışarıda bırakır; Oort bulutunda $\beta = 0,25'$ 'tir ve $D \approx 1,3$ çarpanı ışıyım yoğunluğunu şimdiden neredeyse üç katına çıkarırdı. Satürn'ün halkaları; C (1,275–1,58 R_S), B (1,58–2,018), Cassini bölümü (2,018–2,10), A (2,10–2,349) ve Encke (2,291–2,297) şeritlerine sahip, sahnede $R_S = 58.232$ km olan sentetik bir malzemedir: kilometre cinsinden kenarlar 74.246 (C iç; NASA 74.658), 92.007 (C/B; 91.975), 117.512 (B dış; 117.507), 122.287 (A iç; 122.340) ve 136.787 km'dedir (A dış; 136.780) — farklar en çok %0,55'tir; sentetik olan dokudur. Uranüs'ün halkaları, 1,62'den 2,07 R_U 'ya 0,075 R_U adımlarla ortalanmış, 400 ile 1.500 km arası genişlikte, görünürlük için genişletilmiş yedi sahne şerididir: gerçek halkalar 1 ile 10 km genişliktedir (ϵ halkası 20 ile 100 km). Saydamlıkları ve gölgeleri vardır, kendi salmaları yoktur.

8.3 Oort bulutu ve Yerel Kabarcık

Güneş'ten 2.000 AB uzaklıktan itibaren (gemi zamanıyla 90,2 gün, $\beta = 0,25$) gemi zamanıyla 24 saatlik bir bölüm, ay dokulu, 35 ile 125 km arası büyüklükte üçer buzlu cisimden oluşan dokuz grup sunar; bunlar gemi saatiyle 00.00 ile 23.52 arasında gemiye 4.500 km'ye kadar yaklaşarak geçer; günün sonu yalnızca diziyi bitirir — model buluttan çıkışı 100.000 AB'de, 574. günde konumlandırır. Gerçek bulut gözlenmemiştir, çıkarımla bilinir; 1 km'den büyük cisimler birbirinden onlarca AB uzaktır ve 24 saatte bunlardan birinin 10 bin kilometre yakınından geçme olasılığı esasen sıfırdır. Yerel Kabarcık'ın filament "duvarı", 300 ı.y.'de bir Gauss geçişidir ($\sigma = 0,003$ ı.y.); Doppler ya da sapınç olmadan, fraktal gürültüyle ekran koordinatlarında çizilir; gerçek kabarcık sıcak gazdır, optikte görünmez ve keskin bir sınırı yoktur; 300 ı.y.'de gemi zaten $\gamma \approx 310'$ 'dadır. Helyosferik kilometre taşları (90 AB'de sonlanma şoku, 120 AB'de heliyopoz, 165 AB artı 2025'ten beri yılda 3,57 AB'de Voyager 1, 40 AB'de Kuiper kuşağı) yuvarlatılmış değerlerdir ve Güneş'e uzaklık olarak ölçülür.

9. Göstergeler, seyir defteri ve gemi telsizi

9.1 Paneller

Tüm paneller durumun saf fonksiyonlarıdır (Bölüm 2.3); belgeye erişimi olmayan modüllerde biçimlendirilir ve Node'da test edilir. Hız paneli hızı km/h olarak, c'nin kesrini %100'e olan farkın en az iki anlamlı basamağıyla (itki dönüşünde %99,9999962), öz hız $\gamma\beta c$ 'yi dinamik birimlerle (gemi saniyesi başına km, bin km, milyon km, AB) ve *rapidite şeridini* gösterir: η her gemi gününde aynı oranda arttığından gemi şerit boyunca sabit adımla ilerler ve $\eta = \frac{1}{2} \ln((2 - \epsilon)/\epsilon)$ 'daki c'nin %50, %90, %99, ... %99,99999'u işaretleri neredeyse eşit aralıklı durur. Zaman paneli, Dünya'nın öndeliğini, $t_{\oplus} - \tau$, pikosaniyeden başlayan dinamik birimli 1-2-5 tam ölçek dizisinde (bunun altında fark, ilk saniyelerde integrasyonun çözünürlüğünün altında kalır) ve γ çarpanını logaritmik ölçekte gösterir; yine logaritmik ölçekli kütle, yedeğin yanında, "Kütle ve yakıt" panelindedir. Seyrüsefer haritasının 64 s'lik bir döngüsü vardır: genel görünümde 10 s, 2 s yaklaşma, yerel görünümde 50 s ve 2 s dönüş; geçişler sırasında gemi cetvel üzerinde ilerlemeyi sürdürür. Genel görünüm konumu, itki dönüşünden önce $u = (r - R_{\oplus})/(r_F - R_{\oplus})$ ve $k = 10^{12}$ ile $X = \frac{1}{2} \ln(1 + k u)/\ln(1 + k)$ üzerinden, sonra da (8) ile değerlendirilen $w = (D - r)/(D - r_F)$ ile $X = 1 - \frac{1}{2} \ln(1 + k w)/\ln(1 + k)$ üzerinden eşler: cetvel itki dönüşünde kat edilen mesafeden kalan mesafeye geçer ve hem ilk kilometreler hem son ışık yılları görünür kalır; Dünya ve Plüton Güneş

Sistemi'nin sabit referanslarıdır, sıradaki karşılaşma vurgulanır. Yerel görünüm iki kilometre taşı gösterir — öncekini ve sonrakini; mesafeler gösterilen birimde yuvarlanır ve karşılaşmalara öncelik verilir — ve kilometre taşı uzaktayken, hareketin algılanabilir kalması için yerel artışlarla birlikte yuvarlatılmış mutlak bir referans; alt okumalar iki görünüm arasında farklıdır ve duruşa kadar gemide ölçülen mesafe, kalan mesafenin γ 'ya bölümüdür. Işınım paneli, arkadaki Güneş ve pruvadaki CMB için kendi tepesine normalize edilmiş λB_λ 'yı çizer ve bir enerji şeridinde Güneş'in ışınım akısı $L_\odot/(4\pi d^2) \cdot D^2$ 'yi pruvadaki CMB ışınım akısıyla karşılaştırır (Bölüm 5): kozmik arka plan, ilk gemi yılından önce Güneş'i geçer; itki dönüşünde arkadaki Güneş'in $5,4 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2$ 'sine karşı 217 W/m^2 'dir — $\approx 4 \times 10^{23}$ çarpanı — ve varışta, gemi dururken, $\approx 5 \times 10^8$. Arka kamera, Dünya'yı ya da Güneş'i yayım tarihi, ışığın yaşı ve ağır çekim çarpanıyla (9) birlikte gösterir; ön ve arka pencere seyir evresinde 10 ve 5 Hz'de güncellenir.

9.2 Kabin ışığı

Kabin, hesaplanmış üç ışık katmanına sahip tek bir görüntüdür: çarpımsal olarak bir sirkadiyen döngü (gündüz saat 07'den 19'a, gece saat 22'den 05'e sıcak tonlu %55, aralarında geçiş rampaları); toplamsal olarak pencereden giren ışık — tırmanış sırasında Dünya'nın gündüz ışığının ($0,15 \cdot e^{-h/8.500 \text{ m}}$) ve pruva sıcaklığındaki kara cismin görünür kesriyle dönüştürülüp 550 W/m^2 ile normalize edilen CMB ışınım akısının toplamı; bu, 7 yılda görünür Güneş ışığının %0,32'sini, itki dönüşünde %5,37'sini verir (bir aydınlatma yaklaşımı: CMB sıcaklığı yönle değişir ve katsayı pruvadakini kullanır); ve opaklığı $0,09 \cdot \text{düzey}/(1 + \text{dış ışık}/0,005)$ olan, dışarıdan ışık geldiğinde azalan bir cam yansıması. Yapımcı plakası ve kabin gölgeleri bu katmanları izler; kalibre edilmiş fotometri yoktur.

9.3 Seyir defteri ve telsiz

Seyir defteri, durum fonksiyonunu ve bir ikiye bölme çözücüsünü alan kilometre taşı modülleriyle üretilir: her kilometre taşı (kurtulma, yörüngeler, 1 ışık günü, heliyopoz, Oort, CMB sıcaklıkları, sapınç yarım açısı, "Dünya'da +100 yıl", Proxima, Sirius, Vega ve Betelgeuse gibi referans yıldızlar, hız eşikleri, itki dönüşü, varış) elle yazılmamış, hesaplanmış bir τ anıdır ve kaynağı kodda not edilmiş 108 bağlam bilgisi kilometre taşlarına eşlik eder. Gemi telsizi, önceden yazılmış 2.415 replikten (241 özgün ve bir genişletmeden gelen 2.174) oluşan bir haber şerididir; üç sesi vardır — Borealis ve iki kurgusal çalışan: Uyum ve Varlık Bütünlüğü Müdürlüğü'nden Nermin Hanım ile Operasyon Desteği ve Acil Durumlar biriminden Hüseyin Bey. Katalog yorumları rakamlara ilişkin editoryal bir kısıtlamaya uyar; "1 g" ve "24 sa/24 saat" için istisnalar vardır; ayrıştırıcı ayrıca geminin onaylı sloganını da korur. Sayıların yazıyla yazılmasına idari mizahta izin verilir, ama fiziksel veri sunmak için değil. Bildirimlerdeki değerler simülasyondan gelir; editoryal inceleme ve testler, yorumların okuma ya da arıza uydurmadığını ve kilometre taşlarıyla çelişmediğini doğrular. Dağıtım deterministiktir: her replik bir uçuş evresine ve bir konuya sahiptir, önceki ya da sonraki kilometre taşına ve yakınlık pencerelerine göre seçilir, 15 dk dolmadan tekrarlanmaz (son 24 replikin geçmişi) ve karakterlerin yanıtları 5 dk sonra ya da evre değiştiğinde geçerliliğini yitirir; güncelliğini yitirmiş mesajlar atılır. Gerçek zamanlı yapay zekâ metin üretimi yoktur.

10. Uygulama ve sayısal sağlamlık

10.1 Mimari

Uygulama statiktir: HTML, CSS, JavaScript (ES modülleri) ve WebGL2; çalışma zamanı kütüphanesi yoktur. Durum fonksiyonu (Bölüm 2) saf ve deterministiktir; kare döngüsü saati okur, durumu hesaplar ve panelleri, gökyüzünü, arka kamerayı ve telsizi günceller. Gökyüzü bir HDR nokta geçişi (Gauss PSF'li ve çözümlendiğinde fiziksel diskli yıldızlar), bir arka plan geçişi (yaygın Samanyolu, Dünya, atmosfer), bulutsu için hacimsel bir geçiş (Sütunlar 40 px'ten fazla yer kaplayana kadar yarım çözünürlük) ve CMB'yi 32 bitte

toplayıp (13)'ü uygulayan son bir birleştirme geçişi kullanır. Kare hızları evreye göre seçilir: yakın geçişlerde 60 Hz, ilk iki günde 30 Hz, seyir evresinde 10 Hz (arka kamerada 5 Hz); çünkü seyir evresinde kare ölçeğinde hiçbir şey değişmez.

10.2 Kararlı formülasyonlar

Yolculuğun birçok büyüklüğünde kalkış ile itki dönüşü arasındaki oranlar 10^7 – 10^{19} mertebesinde ve çift duyarlık ($2^{-52} \approx 2,2 \times 10^{-16}$) saf biçimler için yetmez. Yapılan seçimler:

- **Durum değişkeni olarak rapidite.** η , τ 'da doğrusaldır (5); β , γ ve $\varepsilon = 1 - \beta$ ondan türetilir: $\varepsilon = 2/(e^{2\eta} + 1)$, $1 - \tanh \eta$ 'daki basamak kaybını (10^{-16} 'da doyuma ulaşır) önler ve kayan nokta sınırları içinde çok daha küçük değerleri temsil eder. İtke dönüşünde $\varepsilon = 3,84 \times 10^{-8}$ 'dir: hız c 'ye 41,5 km/h uzaklıktadır ve bu sayı iki anlamlı basamakla gösterilir.
- **Kalan mesafe.** $D - r$, $6,6 \times 10^{19}$ m'nin son kilometrelerini yitirdi (bu büyüklükte double'lar arasındaki aralık 8.192 m'dir); frenleme, sürekli biçimde sifra giden (8)'i kullanır ve rota haritası kilometreye ondan dönüştürür.
- **Hiperbolik fonksiyon farkları.** (6), evre 2'nin başında basamak kaybedecek olan $\cosh \eta - \cosh \eta_1$ yerine çarpım-toplam özdeşliklerini kullanır.
- **Doppler ve sapınç.** (10) ve (11) hiçbir zaman $1 - \beta \cos \theta$ ifadesini oluşturmaz; açı, $\sin \theta / (1 + \cos \theta)$ ve $(1 - \cos \theta) / \sin \theta$ dallarıyla $\tan(\theta/2)$ olarak taşınır; $\tan(\theta'/2) > 10^{15}$ sınırı $\theta' = \pi$ olarak ele alınır. Güneş dipolüyle birleştirme $\gamma - |\gamma\beta|'y_i e^{-\eta}$ olarak hesaplar.
- **Yakıt.** Kesirler $\exp m1/\exp$ ile, yedek doğrudan hesaplanır; telsiz biçimlendirmesinde yüzdeler ondalık tamsayılarla (BigInt) tutulur; böylece %99,9... ve %0,0...1, yedek sifra yuvarlanmadan toplamda %100 eder.
- **Kozmik arka plan.** Logaritmik tabloda ışınım yoğunluğu; tepe noktasında kararlı $|d - \text{eksen}|^2$ ile sıcaklık; akı korumalı piksel başına integrasyon, açısal birimlerle alt bölme ölçütü; taşmaması için 60.000 ile sınırlanan, yıldızların yarım duyarlıklı *buffer*'ının dışında 32 bitlik toplam.
- **Derinlik.** d ışık yılı cinsinden olmak üzere $\log_2(1 + d)/34$ logaritmik kodlaması, yıldızlar ve bulutsu arasında paylaşılır: aynı *buffer*'da birçok büyüklük mertebesine yayılan bir aralık — çözünürlük değil, temsil edilebilir aralık; float32'de $1 + d$ terimi $\sim 10^{-7}$ ı.y.'nin altındaki artışları yitirir.
- **Saat.** HEAD ile sunucuya hizalama (bir tahmin, Bölüm 3.1); T_0 ve zamanlar milisaniye cinsinden tamsayılardır; $\tau = t - T_0$, $\sim 10^5$ yıl boyunca çift duyarlıkta kesindir.

10.3 Doğrulama

Depo, her değişiklikte çalıştırılan, 19 dosyaya dağılmış 128 otomatik test (Node.js) ve tarayıcıda iki doğrulama sayfası (rota haritası için 806, telsiz metinleri için 2.804 denetim) içerir. Fiziksel testler arasında şunlar vardır: CMB ışınım akısının iki analitik limitine karşı denetimi; $H\alpha$ salma gücünün salma ölçüsü–Rayleigh bağıntısına karşı denetimi; τ_{fim} 'de $v = 0$ ve toplam yakımla duruş; geçişlerdeki hız (yer değiştirme = $\gamma\beta c \Delta\tau$); benzetimli bir saatin ardından CMB'nin kararlılığı ve geçmişten bağımsızlığı; arkada yapay tepe olmaması; arka kameradaki Dünya görüntüsü; ve gölgelendiricinin nokta geçişinin HYG'nin 109.400 yıldızı üzerinde çalışan bir CPU kopyası; bu kopya durgun hâldeki kadir sınırını sabitler (kadirin tam sayı kısmına göre gruplanmış: 7 kadir kadar her yıldız görünür; 8 kadirdekilerin %30–60'ı; 9 kadirdekilerin hiçbirisi; tüm gökyüzünde 50.000–62.000 görünür yıldız), ayrıca Sirius'un beyaz rengini, gemi zamanıyla 1 yılda öndeki yıldızların artışını, 3 yılda kaydırılmış soğuk yıldızların baskınlığını ve itki dönüşünde 300–2.000 yıldızlı 1°'lik halkayı denetler. 1.0 sürümünün temizliği, dondurulmuş bir durumun pikselden piksele karşılaştırmasıyla denetlenmiştir (piksellerin %0,03'ü farklı; yalnızca saatle değişen rakamlar). Bu bölümdeki sayılar sitenin 1.1.0 sürümüne (19.10.2026) aittir: testler hybrid/ klasöründe

node --test check-*.mjs ile çalıştırılır ve doğrulama sayfaları tarayıcıda açılır (check-route.html, check-radio.html); verilerin ve ağı kaynakları, dosyaların özetleriyle (hash) birlikte "Kaynaklar ve emeği geçenler" sayfasındadır. Bu testler modelle iç tutarlılığı doğrular; gözlemsel doğrulama değildir — onlardan geçmek fotoğrafları kalibre etmez, bir insan gözünün o parlaklığı göreceğini de kanıtlamaz.

10.4 Yayın ve gerçek zaman

Site statik dosyalar olarak yayımlanır; yayın, sürümü, bir derleme kimliğini ve $T_0 = 1792422000000$ ms (Unix dönemi) anını damgalar ve bu an mühürlüdür: sonraki her yayın aynı T_0 'ı tekrarlar ve geliştirmede kullanılan zaman kısayolları yayımlanan kopyada yok sayılır. Bu an tüm ziyaretçiler için tektir; gösterilen durum, gerçek saatte değerlendirilen durum fonksiyonudur.

11. Sınırlamalar ve bilinen sorunlar

Basitleştirmeler kamuoyu için "Şiirsel serbestlik" sayfasında listelenmiştir; burada türlerine göre, büyüklükleri hakkında bilinenlerle birlikte düzenlenmiştir.

11.1 Üstlenilen imkânsızlıklar

- **İtki.** Kusursuz bir foton roketi yoktur. 100 t'luk toplam kuru kütle için $5,2 \times 10^7$ kütle oranı ve kalkıştaki $1,68 \times 10^{22}$ W'lık güç, bilinen her türlü mühendisliğin dışındadır. Kaybedilen kütle enerjisinin sabit bir $1 - f$ kesrinin paralel demetlenmiş fotonlar olarak salındığı, geri kalanının ise geminin anlık referans sisteminde izotropik olarak kaçtığı basitleştirilmiş bir modelde kütle oranı $e^{b_{\text{fım}}/(1-f)}$ 'dir: varsayımsal bir örnek olarak, %50'lik bir verim bu oranı $5,2 \times 10^7$ 'den $2,7 \times 10^{15}$ 'e yükseltir — bu yüzde, antimadde motorları için evrensel bir verimi temsil etmez. Tankların, radyatörlerin ve yedeğin kütlesi sıfırdır.
- **Kalkan ve mürettebat.** $5,9 \times 10^{10}$ W/m²'lik akının ($n = 0,1$ cm⁻³) gemi üzerinde etkisi yoktur; doz, tanecik aşındırması, ikincil ısıtım ve iyonlaşma modellenmemiştir; itki dönüşü anlıktır; tırmanıştan sonra, ivmelenmede ve frenlemede kesintisiz 1 g (duruşta sıfır); yaşam desteği yoktur.
- **Fırlatma.** Atmosfer, sürüklenme, Dünya'nın dönüşü (465 m/s) ya da yörünge hareketi (29,8 km/s) olmadan, park yörüngesi olmadan dikey tırmanış; 400 km'lik bir yörüngeden kalkmak yakıtı %0,008, gemi zamanını 41 dk değiştirdi. Tırmanış yönü rotanın yönüdür; bu, T_0 'da M16'nın üssün başucunda olmasını gerektirirdi; 19.10.2026 öğle vakti ise o boylamda $\sim 30^\circ$ yükseklikteydi ve Dünya'nın sabit görsel yönelimi bu farkı gizler.

11.2 Verilerin sınırları

- **Uzaklık.** M16'nın merkezine 7.000 ı.y. klasik değerdir; Gaia DR2 ıraklık açıları NGC 6611 için 1.740 ± 130 pc $\approx 5.700 \pm 400$ ı.y. verir [18]. Fark gemi zamanını az değiştirir ((7)'deki logaritma nedeniyle 17,2 $\rightarrow$ 16,8 yıl), ama Dünya'daki zamanı ~ 1.300 yıl değiştirir ve bulutsunun tüm boyutlarını ölçekler (Sütunlar'ın yüksekliği 8,6 $\rightarrow$ 7,0 ı.y.).
- **Bulutsu.** Derinliğin tamamı varsayımdır: levhalar, yıldızların ortak düzlemi, vurgulama üssü, $\tau_f \rightarrow \tau_v$ dönüşümü, albedo, g , κ , tek bir salma ölçüsü; kümenin ~ 500 yıldızından yalnızca sekizi gazı aydınlatır; çizgi tayfı tek bir noktadandır, yalnızca optiktir; çoklu saçılma yoktur; bulutsu fotoğraflardaki gibi gösterilir — benimsenen uzaklıkta 2026'dan ~ 6.992 yıl önce yayımlanmış ışık —, oysa varışta, kalkıştan 6.987 Dünya yılı sonra, gemi o andan ~ 7 yıl önce yayımlanmış ışığı alır: gözlenen iki dönem arasında modellenmemiş ~ 14.000 yıllık bir evrim vardır. Ölçülen fotobuharlaşma hızına göre (McLeod ve ark. [15]: $\sim 70 M_\odot/\text{Myr}$, ömür ~ 3 Myr) değişim küçük olurdu. Spitzer verilerinden yola çıkan yakın tarihli bir süpernova önerisi [19] kamuoyuna yayılmış bir varsayımdır; 1995 ve 2014 tarihli Hubble görüntüleri [13] Sütunlar'da yalnızca küçük değişiklikler kaydeder.

- **Kataloglar.** Gerçekteki milyarlarca yıldız karşı 299.858 yıldız; sönük ve uzak olanlar eksiktir, özellikle sapıncın M16 yakınında pencereye getireceği yıldızlar; Gaia ekinin hızları yoktur (hareketsiz kalır) ve şimdikinden $0,1^\circ$ farklı, daha önceki bir rota eksenine seçilmiştir; sıcaklıklar renge ya da sınıfa göre, tayflar çizgisizdir.
- **Toz.** Pürüzsüz bir disk modeli (12), Serpens/Aquila yönündeki gerçek bulutlar olmadan; yaygın Samanyolu ve dış gökadarlar sentetiktir.
- **M16'nın hareketi.** Güneş ile küme arasında hiçbir görelî hız yoktur; göz ardı edilenin ölçeği, km/s başına 7.000 yılda 0,024 ı.y.'dir.

11.3 Sahne tercihleri

- **Karşılaşmalar.** Gezegenler yörünge yarıçapının kesişimine, dönüşümlü taraflara, 1,5 yarıçap uzağa yerleştirilmiştir; sabit yönlü aydınlatma (gerçek olmayan evre); gezegenlerde renkte Doppler ya da ışıının yoğunluğu kazancı yoktur ($\beta \leq 0,036$ ile frekansta %3,7'ye, ışıının yoğunluğunda %15,5'e kadar; Oort bulutunda $\beta = 0,25$ ve $D \approx 1,3$ parlaklığı neredeyse üç katına çıkarırdı); Satürn'ün halkaları sentetiktir, kenarları gerçeklerinden en çok %0,55 sapar; Uranüs'ün halkaları gerçekteki 1–10 km'ye karşı 400–1.500 km genişliğinde şeritlerdir; Jüpiter'in uyduları sabittir; Charon Plüton'a gerçekte olduğundan ~%20 daha yakındır; asteroit kuşağı olarak yirmi kaya; Oort bulutunda 24 sa içinde uydurulmuş dokuz grup (gerçek sıklık ≈ 0); 300 ı.y.'deki Yerel Kabarcık "duvarı" sanatsaldır.
- **Dünya.** Tarihsel bulutlarla 2004 tarihli Blue Marble haritası; gösterilen Dünya dönmez (T_0 'ın meridyeni ve gece-gündüz çizgisi); meteoroloji, mevsimler ya da şehir ışıkları yoktur.
- **Kabin ve algı.** Işık katmanlarına sahip tek bir görüntü; ses, titreşim ya da ağırlık yoktur; sabit pozlamalı kamera, gözün uyumu ya da monitörün fotometrik kalibrasyonu yoktur; cam yansıması görsel bir katmandır, optik bir simülasyon değildir.
- **Anlatı.** Gemi, üs, plaka ve gemi telsizi (2.415 replik, kurgusal karakterler, uydurulmuş okuma ya da arıza yok) kurgudur; şirket gerçektir.

11.4 Bilinen iç tutarsızlıklar

- Kalkan hesabında ortamın yoğunluğu tüm yolculuk boyunca $0,1 \text{ cm}^{-3}$ 'tür; egzozdan saçılan parıltının tahmini ise rota üzerinde 1 cm^{-3} , M16 boşluğunda 100 cm^{-3} kullanır; helyosferin içinde değer yine farklıdır. Kalkandaki ısı, seçime bağlı olarak 10 kat değişir.
- Güneş ısıtması, enerji panelinin birimlerinde $3,83 \times 10^{26} \text{ W}$, kilometre taşlarında $3,828 \times 10^{26} \text{ W}$ olarak görünür (%0,05).
- Seyir defterinin metinleri bitiş noktasına "Sütunlar'a varış" der; harita ise onu, en yakın yüzeyden 6,9 ı.y. uzaktaki duruş noktası olarak adlandırır.

11.5 Modelin varsayımları ve duyarlılığı

- Kalkanın denge sıcaklığı tek yüzden ışıınımlı kullanır; iki yüzden ışıınımla $2^{-1/4}$ (%16) daha düşük olurdu.
- Tersine çevrilen fotoğrafik vurgulama (üs 2,4), ağın 1,725 çarpanı, $\tau_v \leq 8$ tavanı ve $142 \times 234 \times 218$ ızgarası ölçüm değil, belgelenmiş tasarım tercihleridir; bunları değiştirmek, hiçbir veriyle çelişmeden bulutsunun görünümünü değiştirir.

12. Sonuç

Borealis Horizon, görelî bir yolculuğun kamuoyuna doğru sayılarla, gerçek zamanlı olarak, 17 yıl boyunca, bir tarayıcıya sığan kodla sunulabileceğini gösterir: kapalı biçimde kinematik, yön yön dönüştürülen ışık,

Planck yasasından hesaplanan kozmik arka plan ve kamuya açık gözlemlerden kurulan bir bulutsu; tümü sabit pozlama ve belgelenmiş görsel tercihler altında. Bedeli beyan edilmiş basitleştirmelerdir — var olmayan bir motor ve kalkan, gözlemlerin tek başına belirlemediği hacimsel bir bulutsu dağılımı, güzel göründükleri yere yerleştirilmiş gezegenler — ve bu belge, okur tam olarak neye baktığını bilsin diye bunları her birinin büyüklüğüyle birlikte açıkça ortaya koyar.

Kaynakça

- [1] Rindler, W. *Relativity: Special, General, and Cosmological*. 2. bs., Oxford University Press, 2006.
- [2] Møller, C. *The Theory of Relativity*. 2. bs., 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); sapıncın yarım açi biçimi, doğrultu kosinüslerinin Lorentz dönüşümünden çıkar.
- [5] Peebles, P. J. E.; Wilkinson, D. T. "Comment on the anisotropy of the primeval fireball". *Physical Review* 174, 2168 (1968) — ışınmı yoğunluğu $\propto D^4$ ve I_ν/v^3 'ün değişmezliğı.
- [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* — Celestia için Gaia EDR3 / Hipparcos / Tycho (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), denk. 29.2: $T_0 = 2,7255$ K; (l, b) = (264,021°, 48,253°) yönünde 369,82 km/s dipol. 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) ve heic1501 basın bülteni, 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* (Ocak 2004) ve *Blue Marble Clouds*.
- [21] Solar System Scope. *Solar System Textures* (CC BY 4.0); NASA/JHUAPL/SwRI, Plüton haritası (New Horizons).
- [22] Ashby, N. "Relativity in the Global Positioning System". *Living Reviews in Relativity* 6, 1 (2003).

Ek A. Sabitler ve parametreler

Simge	Değer	Kullanım
c	299.792.458 m/s	kesin
g_0	9,80665 m/s ²	seyir evresindeki öz ivme
yıl	365,25 gün = 31.557.600 s	ışık yılı = $9,4607 \times 10^{15}$ m; gemi takvimi
AB	$1,495978707 \times 10^{11}$ m	öz hız, kilometre taşları
$R_{\oplus}$	6.371 km	$GM = g_0 R_{\oplus}^2$
T_0 (CMB)	2,7255 K	monopol
Güneş dipolü	369,82 km/s; (l, b) = (264,021°, 48,253°)	geminin Lorentz itmesiyle birleştirme
σ	$5,670374419 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$	ışınım akısı, kalkan
$m_p c^2$	$1,50327759 \times 10^{-10} \text{ J}$ (938,27 MeV)	kalkan üzerindeki akı
n	0,1 cm ⁻³	ortamın yoğunluğu (kalkan)
m_{fim}	100 t	kuru kütle
D, uzaklıklar	7.000 ı.y. (M16'nın merkezi); 6.992 ı.y. (Sütunlar düzlemi); 6.985 ı.y. (duruş)	rota
rota yönü	l = 16,890922°, b = 0,753177°	Sütunlar'ın üst üçte biri
toz	$K = 5,1 \times 10^{-4} \text{ ı.y.}^{-1}$; H = 330 ı.y.; $z_{\odot} = 65 \text{ ı.y.}$; kanallar (-0,18; 0; 0,30)	sönümleme
pozlama	1.200 px/rad'da $E_{\text{karanlık}} = 5.400$; $\sigma_{\text{PSF}} = \max(0,55 \text{ px}, 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad})$	gökyüzü
bulutsu	ölçek 1,725; levhalar 15 ı.y. (σ 3), 8,5 ı.y. (σ 2), yıldızlar 3,2 ı.y.; $\tau_v = \tau_f(1 + 2,6\tau_f)$; albedo 0,5; g = 0,6; $\kappa = 6 \text{ ı.y.}^{-1}$; 224 örnek	taşınım

(12)'nin, düzlemden ölçülen z_0 ve z_1 yükseklikleri arasındaki d uzunluğunda bir parça boyunca optik derinliği: $|z_1 - z_0| < 10^{-3} d$ ise $\tau = K d e^{-|z|/H}$, aksi hâlde $\tau = (K d / \Delta z) [\text{sgn}(z_1) H (1 - e^{-|z_1|/H}) - \text{sgn}(z_0) H (1 - e^{-|z_0|/H})]$.

Ek B. Yolculuğun kilometre taşları

Kilometre taşı	Gemi zamanı	Durum
Dünya kütleçekiminden kurtulma ($v^2 = 2GM/r$)	44 dk	net 0,1–1 g ile tırmanış
Ay (yörünge yarıçapı)	2,98 sa	307 bin km/h; çapı geçmek için 41 s
Tırmanışın sonu (kapalı biçimin başlangıcı)	24 sa	$34,9 \times 10^6$ km; 827 km/s
Mars · Ceres · Jüpiter	2,19 · 3,27 · 4,59 gün	1,5 yarıçapta sahnelenmiş geçişler
Satürn · Uranüs · Neptün · Plüton	6,25 · 8,87 · 11,1 · 12,7 gün	Plüton $38,7 \times 10^6$ km/h hızla
Oort bulutu (2.000 AB)	90,2 gün	$\beta = 0,25$; modelden çıkış (100.000 AB) 574. günde
Yerel Kabarcık (300 ı.y.)	6,23 yıl	$\gamma \approx 310$
Pruvada 1.000 K'lık CMB	5,72 yıl	Tablo 2
İtke dönüşü	8,606 yıl	$\gamma = 3.606$; Dünya'da 3.493 yıl; 3.492,5 ı.y.
Duruş	17,211 yıl	6.985 ı.y.; Dünya'da 6.987 yıl; $v = 0$; yakıt sıfır

Borealis Dynamics · Borealis Horizon, sürüm 1.1.0 · Her içeriğin kaynakları ve lisansları sitenin "Kaynaklar ve emeği geçenler" sayfasında, basitleştirmeler "Şiirsel serbestlik" sayfasında, her sürümün değişiklikleri ise "Sürümler" sayfasındadır. Site ticari değildir, eğitici ve ücretsizdir.