

宇宙は、すでに滅びた文明の残響で満ちているのかもしれない。

本作は、恒星間コミュニケーションを最小限の規則で可視化するシミュレーションである。

通信が可能な文明は、恒星(点)として表現される。文明は生存しているあいだ、恒星を中心に円環状の電波(波面)を周期的に放射し、その波面は一定速度で宇宙空間を広がっていく。波面が別の通信文明に到達すると、受信側は発信源の位置へ向けて直線状の交信(返信)を試みる。両文明が生存している場合、両者の間には通信リンクが成立し、以後は信号が往復し続ける(会話の「維持」を象徴する最小モデル)。一方で文明は一定確率で滅び、滅びた文明は以後送信せず、恒星としての表示も消える。しかし、滅びる以前に放たれた波面は空間に残り続けるため、受信側が返信を試みても相手がすでに存在しない、という「時間差の沈黙」が起こりうる。ここで描かれるのは、通信の成功よりも、通信が成立しにくい宇宙の構造である。

### ### 空間・時間スケール(初期値)

本シミュレーションは天の川銀河を想定し、銀河円盤の直径をおよそ \*\*10 万光年\*\* に対応づけている。ワールド座標は一辺 1000 の正方領域で、\*\*1 unit = 100 光年\*\* として解釈する(したがって世界の幅 1000 unit  $\approx$  10 万光年)。なお、画面上の 1px が示す距離は、初期表示のズームや画面サイズにより変化する(拡大・縮小で可変)。

時間は鑑賞のために圧縮され、初期値では \*\*1 秒 = 1000 年\*\* として進む(倍率で変更可能)。電波/交信の速度は初期値で \*\*10 unit/秒\*\* であり、これは 1 unit=100 光年 $\cdot$ 1 秒=1000 年の換算により \*\*約 1 光年/年(光速)\*\* に相当するように置いている。結果として、銀河半径(約 5 万光年)規模の伝播は、およそ 50 秒程度で画面上に観測できる。

### ### 通信文明の発生(初期値の根拠)

通信文明の誕生は、個々の恒星系が「通信文明へ到達するまでの待ち時間」を持つ、として単純化している。地球史を参照し、通信可能な文明に至るまでの時間スケールを \*\*中央値 40 億年\*\* と仮定し、これを「一定確率で到達する」指数分布(一定ハザード)に変換して用いる。すなわち、通信文明化の年率は

$$[\lambda = \ln 2 / (4 \times 10^9 \text{ 年})]$$

である。

ただし実際の銀河の恒星数(数千億)をそのまま計算・描画することは不可能なため、本作では \*\*Effective stars(代表恒星数)\*\* というパラメータで、銀河全体を代表する試行数を置いている。初期値では Effective stars を  $10^6$  とし、銀河全体での文明誕生頻度が鑑賞可能な範囲になるよう調整している(この値はコントロールパネルで変更でき、沈黙/賑わいの境界を

探索できる)。

### ### 文明の滅亡(初期値の根拠)

文明は永続しないものとして、存続期間を指数分布で表す。ドレイク方程式の文脈でしばしば例示される値にならない、文明存続期間を \*\*中央値 10,000 年\*\*と仮定し、滅亡の年率を

$$[\mu = \ln 2 / (10^{\text{年}})]$$

として実装している。これにより、文明が長く残りリンクが維持される世界にも、すれ違いの沈黙が支配する世界にも、同じ枠組みのまま遷移できる。

### ### 本作の焦点と限界

本作は「電波が物理的に届くか」よりも、「誕生・存続・距離・時間差が噛み合うか」に焦点を当てている。そのため、距離減衰、周波数帯の不一致、指向性ビーム、観測の断続性などは捨象している(今後の拡張余地)。それでもなお、波面が空間に残り、返信が空振りし、会話が成立したとしてもいつか途切れる——その幾何学的な振る舞いを通して、私たちが感じる宇宙の沈黙を別の角度から手触りとして提示する。

The universe may already be saturated with the echoes of civilizations that have gone extinct.

This work is a simulation that visualizes interstellar communication through a minimal set of rules.

A civilization capable of interstellar communication is represented as a star (a point). While it is alive, it periodically emits radio waves as an expanding circular  $\phi p o n \tau$  (a ring) centered on its location. The wavefront propagates through space at a constant speed. When the wavefront reaches another communicative civilization, the receiver attempts to reply: it sends a straight-line signal directed toward the position of the original transmitter. If both civilizations are still alive, a communication link is established between them, and thereafter signals continue to travel back and forth indefinitely (a minimal model that symbolizes the “maintenance” of conversation).

Civilizations, however, have a finite lifetime: each has a probability of extinction. Once extinct, it stops transmitting and its star-marker disappears from the display. Yet wavefronts emitted before extinction can remain in space, which means a receiver may attempt to reply to a transmitter that no longer exists—producing a silence born from time delay. What is depicted here is not the triumph of contact, but the structure of a universe in which contact is difficult to sustain.

#### Spatial and temporal scale (default settings)

The simulation assumes the Milky Way. The diameter of the galactic disk is mapped to approximately 100,000 light-years. The world coordinate system is a square of size 1000, interpreted as 1 unit = 100 light-years (so 1000 units  $\approx$  100,000 light-years). The physical distance represented by a single screen pixel varies with the initial zoom level and the viewer’s display; it changes continuously as you zoom in and out. Time is compressed for viewing. By default, 1 second = 1,000 years (adjustable via the speed multiplier). The wave/signal propagation speed is set to 10 units/second by default. With the mapping above (1 unit = 100 ly; 1 second = 1,000 years), this corresponds to  $\sim$ 1 light-year per year, i.e., approximately the speed of light. As a result, propagation across the galactic radius scale ( $\sim$ 50,000 ly) becomes observable on screen in roughly  $\sim$ 50 seconds.

#### Emergence of communicative civilizations (default rationale)

The emergence of a communicative civilization is simplified as a waiting-time process at the level of a stellar system. Referring to Earth’s history, the time scale to reach an interstellar-communication-capable civilization is set to a median of 4 billion years. This

median is converted into an exponential waiting-time model (constant hazard), i.e. the per-year rate is

$$[\lambda = \ln 2 / (4 \times 10^9 \text{ years}).]$$

The Milky Way contains on the order of hundreds of billions of stars, which is far beyond what can be computed and rendered directly. Therefore, the simulation introduces Effective stars as a parameter representing the number of “representative” stellar systems. The default value is set to  $10^6$ , chosen so that civilization-birth events occur at a frequency that can be meaningfully observed during viewing. This value can be adjusted in the control panel, allowing the viewer to explore the boundary between quiet and crowded universes.

Extinction (default rationale)

Civilizations do not persist indefinitely. Their lifetimes are modeled with an exponential survival process. Following a commonly cited illustrative value associated with the Drake-equation discussion, the median civilization lifetime is set to 10,000 years. This corresponds to an extinction hazard of

$$[\mu = \ln 2 / (10,000 \text{ years}).]$$

With this single framework, the simulation can transition smoothly between worlds where links tend to persist and worlds dominated by near-misses and silence.

Focus and limitations

This work prioritizes whether *birth, persistence, distance, and time delay overlap* rather than the detailed physics of detectability. Accordingly, it abstracts away distance attenuation, frequency-band mismatches, directional beaming, and intermittent observing schedules—each of which is an important factor and a potential avenue for future extension. Even so, through the geometry of expanding rings that outlive their sources, replies that become unanswered, and conversations that can vanish as abruptly as they begin, the piece offers a tangible perspective on the silence we experience when we look into the galaxy.