

# Time Dilation in Interstellar Missions: A Systematic Literature Review on Relativistic Effects and Technological Solutions

Rara<sup>1</sup>, Nadiar Pertiwi<sup>1</sup>, Hamdi Akhsan<sup>2\*</sup>, Melly Ariska<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

Received: 21 May 2025

Revised: 05 June 2025

Accepted: 02 August 2025

Corresponding Author:

Hamdi Akhsan

[hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id](mailto:hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id)

© 2025 Kappa Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License



DOI:

<https://doi.org/doi.org/10.29408/kpj.v9i2.30399>

**Abstract:** Misi eksplorasi antarbintang telah menjadi topik yang kontroversial dalam beberapa dekade terakhir. Efek dilatasi waktu teori relativitas Einstein menjadi tantangan yang kompleks untuk menjalankan misi eksplorasi antarbintang. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis implikasi dilatasi waktu dan solusi teknologi untuk misi antarbintang. Metode Systematic Literature Review (SLR) dengan pendekatan PRISMA digunakan dalam kajian ini. Kami menyaring 1.189 artikel dari basis data termasuk Google Scholar, IEEE Xplore, SpringerLink, Scopus, ScienceDirect, arXiv, dan Springer Nature (2018-2025) dan menghasilkan 40 artikel yang relevan dan memenuhi kriteria inklusi. Teknologi canggih, seperti pesawat nano relativistik Breakthrough Starshot, jam atom presisi tinggi, dan sistem AI otonom, mengurangi tantangan untuk menjalankan misi antarbintang dengan memungkinkan navigasi yang akurat, komunikasi yang andal, dan sinkronisasi waktu. Inovasi ini mendukung aplikasi praktis seperti koreksi lintasan yang akurat dan transmisi data melalui jarak antarbintang. Kesimpulannya, meskipun dilatasi waktu menimbulkan hambatan besar, mengintegrasikan prinsip-prinsip relativistik dengan teknologi mutakhir bisa menjadi solusi dan membuka jalan untuk misi antarbintang di masa depan.

**Keywords:** Atomic clock; Breakthrough stratshot, Interstellar mission, Time dilation.

## Pendahuluan

Misi eksplorasi antarbintang telah menjadi subjek diskusi yang kompleks dan kontroversial dalam beberapa dekade terakhir. Motivasi utama dari misi ini untuk mencari kehidupan diluar bumi serta pengembangan teknologi yang mutakhir memungkinkan untuk perjalanan antarbintang (Neukart 2024), seperti Alpha Centauri yang berjarak 4,24 tahun cahaya (Damasso et al. 2020). Namun, tantangan signifikan seperti fenomena dilatasi waktu menjadi hambatan utama. Dilatasi waktu, sebuah konsekuensi dari Teori Relativitas Einstein, menyebabkan perbedaan laju waktu antara pengamat yang bergerak relatif satu sama lain, sehingga berdampak pada perjalanan ruang angkasa

berkecepatan tinggi (Bruiger 2024), yaitu Breakthrough Starshot, dimana kendaraan dapat mencapai 15-20% kecepatan cahaya, yang menyebabkan proper onboard dapat lebih singkat dibandingkan waktu di bumi (Atwater et al. 2018).

Tantangan dilatasi waktu tidak hanya memengaruhi perencanaan durasi misi, tetapi juga aspek kritis seperti navigasi presisi, komunikasi jarak jauh, dan keselamatan awak. Misalnya, efek dilatasi waktu kecepatan tinggi, sebagaimana diverifikasi oleh eksperimen Hafele-Keating (Arneth 2024a), dan pengamatan peluruhan muon (Casarsa, Lucchesi, and Sestini 2024), menunjukkan bahwa waktu bagi awak atau sistem onboard akan berjalan lebih lambat dibandingkan di Bumi, sehingga memerlukan

## How to Cite:

Rara, R., Pertiwi, N., Akhsan, H., & Ariska, M. (2025). Time Dilation in Interstellar Missions: A Systematic Literature Review on Relativistic Effects and Technological Solutions. *Kappa Journal*, 9(2), 205-212. <https://doi.org/doi.org/10.29408/kpj.v9i2.30399>

sinkronisasi waktu yang sangat akurat. Sementara itu, dilatasi waktu gravitasi, yang diuji melalui Shapiro Delay (Shapiro 1964) dan pengamatan di dekat objek masif seperti lubang hitam atau bintang neutron (Vijayan et al. 2023), memperumit komunikasi sinyal elektromagnetik karena penundaan akibat kelengkungan ruang-waktu. Efek ini menuntut teknologi canggih, seperti jam atom optik berbasis ytterbium atau strontium dengan akurasi hingga  $10^{-18}$  detik, untuk memastikan navigasi dan sinkronisasi waktu yang andal di lingkungan antarbintang (Ludlow et al. 2015).

Efek dilatasi waktu telah dipahami secara teoretis melalui Teori Relativitas Einstein dan divalidasi oleh eksperimen seperti Hafele-Keating (1971) meskipun begitu penelitian yang secara khusus mengintegrasikan fenomena ini dengan solusi teknologi untuk misi antarbintang masih terbatas. Literatur yang ada cenderung berfokus pada aspek fisika teoretis atau teknologi propulsi secara terpisah, tanpa tinjauan sistematis yang menggabungkan efek relativistik dengan solusi praktis untuk mengatasi tantangan seperti sinkronisasi misi, dampak psikologis pada kru, atau komunikasi jarak jauh. Oleh karena itu, tinjauan literatur sistematis ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan menyusun kerangka komprehensif yang mengintegrasikan efek relativistik dan solusi teknologi, serta mengidentifikasi arah penelitian masa depan untuk mendukung misi antarbintang yang layak.

Selain tantangan fisika, pengembangan teknologi untuk misi antarbintang juga menghadapi kendala teknis dan material. Inisiatif seperti Breakthrough Starshot mengusulkan penggunaan nanocraft dengan layar foton ultraringan yang didorong oleh laser berbasis Bumi untuk mencapai kecepatan relativistik (Davoyan et al. 2021). Namun, teknologi ini memerlukan material tahan radiasi kosmik, seperti grafena, serta algoritma relativistik untuk mengoreksi lintasan dan efek dilatasi waktu (Atwater et al. 2018). Komunikasi jarak jauh juga menjadi masalah krusial karena penundaan sinyal hingga bertahun-tahun, sehingga memerlukan sistem otonom berbasis kecerdasan buatan (AI) yang mampu mengelola navigasi dan komunikasi tanpa ketergantungan pada Bumi (Shah and Khan 2024). Sistem AI ini, yang diuji pada misi seperti Mars Rover Perseverance, harus dapat mengatasi distorsi sinyal akibat efek relativistik, seperti pergeseran merah gravitasi, dan mengoptimalkan sumber daya dalam lingkungan ekstrem (Chien 2022).

Lebih lanjut, literatur menyoroti perlunya inovasi untuk melindungi awak atau data dalam misi berawak, terutama dari dampak fisiologis dan psikologis akibat perbedaan waktu yang ekstrem. Konsep time vaults, yang memanfaatkan dilatasi waktu gravitasi di dekat objek masif seperti lubang hitam, diusulkan untuk menyimpan informasi atau bahkan manusia dalam

kerangka waktu yang lebih lambat, sehingga meminimalkan efek penuaan selama perjalanan panjang (Neukart 2024).Tantangan ini menegaskan bahwa pemahaman mendalam tentang relativitas dan pengembangan teknologi berbasis prinsip relativistik, seperti jam atom presisi tinggi dan sistem AI otonom, sangat penting untuk keberhasilan misi antarbintang. Analisis literatur sistematis ini bertujuan untuk memetakan tantangan dilatasi waktu, solusi teknologi yang ada, dan implikasinya bagi navigasi, komunikasi, dan ekspansi manusia ke antariksa, dengan harapan membuka jalan menuju eksplorasi antarbintang yang realistis.

Metode

Penelitian ini menggunakan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengidentifikasi dan mensintesis literatur tentang dilatasi waktu dalam eksplorasi antarbintang, dengan fokus pada eksperimen seperti Hafele-Keating, peluruhan muon, dan Shapiro Delay, serta teknologi seperti kendaraan relativistik, jam atom presisi tinggi, dan sistem AI otonom (Peretz et al. 2022). Pendekatan ini mengikuti pedoman SLR dari (Garcia et al. 2023) untuk memastikan proses yang sistematis dan transparan. SLR dilakukan dalam tiga tahap: perencanaan, pelaksanaan, dan pelaporan. Pada tahap perencanaan, pertanyaan penelitian dirumuskan untuk mengeksplorasi jenis eksperimen dilatasi waktu, teknologi untuk mengatasi efeknya, aplikasi dalam navigasi dan komunikasi, serta jenis pengujian (perangkat keras atau simulasi).

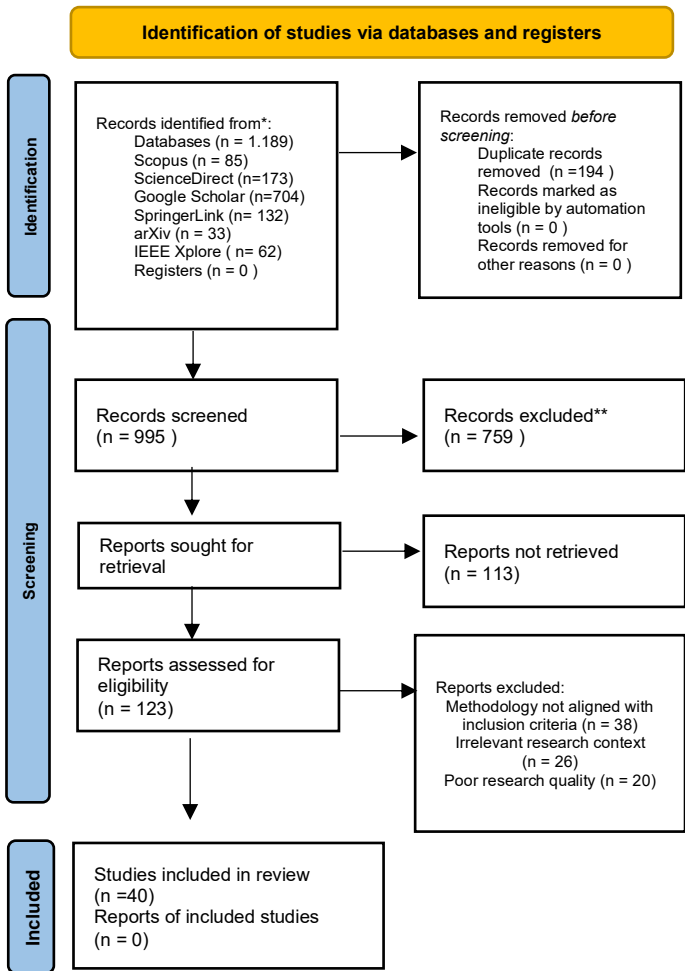
Pencarian literatur dilakukan di database seperti Google Scholar, IEEE Xplore, dan Scopus, menggunakan kata kunci terkait dilatasi waktu dan misi antarbintang. Kriteria inklusi mencakup artikel peer-reviewed berbahasa Inggris (2018-2025, kecuali karya seminal seperti Shapiro, 1964), sedangkan artikel non-peer-reviewed atau tidak relevan dieksklusi. Proses seleksi artikel mengikuti diagram PRISMA, didukung oleh alat seperti Parsifal dan Mendeley. Data disintesis secara naratif untuk menjawab pertanyaan penelitian, dengan validasi oleh dua peneliti untuk meminimalkan bias.

Tabel 1. Kriteria inklusi dan eksklusi

| Kriteria        | Inklusi                                                             | Eksklusi                                                          |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Jenis Publikasi | Artikel <i>peer-reviewed</i> (jurnal, konferensi, <i>preprint</i> ) | Artikel <i>non-peer-reviewed</i> (misalnya, blog, laporan berita) |
| Tahun Publikasi | 2018–2025, kecuali karya seminal (misalnya, Shapiro, 1964)          | Artikel sebelum 2018, kecuali seminal                             |
| Bahasa          | Berbahasa Inggris                                                   | Bahasa selain Inggris                                             |

|           |                                                                                                                                                           |                                                                      |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Relevansi | Membahas dilatasi waktu (misalnya, Hafele-Keating, muon, Shapiro Delay) atau teknologi misi antarbintang (misalnya, jam atom, AI, kendaraan relativistik) | Tidak relevan dengan dilatasi waktu atau teknologi misi antarbintang |
| Data      | Menyediakan data empiris, simulasi, atau implementasi praktis                                                                                             | Tidak menyediakan data empiris atau implementasi                     |
| Akses     | Teks lengkap tersedia                                                                                                                                     | Teks lengkap tidak tersedia                                          |

PRISMA



Hasil dan Diskusi

Teori Dasar Dilatasi Waktu

Teori relativitas khusus membahas hubungan antara ruang dan waktu. Kosekuensi dari teori relativitas khusus Einstein adalah dilatasi waktu, waktu berkorelasi dengan titik referensi (Gianfelice and Wendt n.d.). Einstein dalam teori relativitas khusus menyatakan bahwa “waktu” yang dirasakan pengamat dalam kerangka acuan yang bergerak tidak sama dengan waktu pengamat diam (Kotur and Softlabs n.d.).

(Noer 2021) menyatakan teori relativitas umum mendefinisikan gravitasi sebagai efek kelengkungan ruang-waktu. Einstein menyatakan dalam teori relativitas umum, waktu dapat diperlambat oleh gravitasi. Dilatasi waktu gravitasi adalah hasil dari cahaya yang membutuhkan waktu lebih lama untuk bergerak diantara dua titik terpendek dalam geometri geodesi (Joseph and Forrington 2023),juga merupakan konsekuensi langsung dari Teori Relativitas umum Einstein (1915). Dengan kata lain, keberadaan massa besar menyebabkan kelengkungan ruang waktu dan, sehingga memperlambat alur waktu bagi pengamat yang berada di dekatnya (Will, 2014). Fenomena ini secara matematis dapat dinyatakan melalui metrik Schwarzschild dalam teori relativitas umum (M. Dalarsson, N. Dalarsson.2015), yang berlaku untuk ruang waktu statis dan sferis simetris di sekitar objek bermassa M:

$$ds^2 = -\left(\frac{2GM}{rc^2}\right)c^2dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1}dr^2 + r^2d\theta^2 + r^2\sin^2\theta d\phi^2 \tag{1}$$

Pelebaran waktu gravitasi, diprediksi oleh relativitas umum, terjadi di mana waktu berjalan lebih lambat di medan gravitasi kuat, dinyatakan kembali melalui metrik Schwarzschild dengan rumus:

$$\frac{\tau}{t} = \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} \tag{2}$$

Dilatasi waktu di dekat lubang hitam atau bintang neutron adalah fenomena relativistik di mana waktu berjalan lebih lambat dalam medan gravitasi kuat dibandingkan dengan wilayah gravitasi lemah. (Carson and Yagi 2020) Efek ini ekstrem di dekat horison peristiwa lubang hitam, di mana waktu hampir terhenti bagi pengamat luar, dan signifikan di permukaan bintang neutron karena gravitasinya yang kuat (Stairs 2003). Tujuan utama pengujian ini adalah untuk memverifikasi prediksi relativitas umum dalam medan gravitasi ekstrem (Carson and Yagi 2020) ,untuk mengukur perbedaan laju waktu antara wilayah gravitasi kuat dan lemah secara presisi dan untuk memahami sifat fisik objek, seperti massa dan radius, karena dampaknya pada waktu (Arzoumanian et al. 2009) Dalam konteks misi antarbintang, pengujian ini mendukung pengembangan teknologi navigasi dan komunikasi yang mampu. Sinyal elektromagnetik, khususnya emisi sinar-X dari piringan akresi, diamati menggunakan teleskop (Vijayan et al. 2023). Hasilnya perlambatan waktu dalam radiasi yang datang dari

wilayah yang sangat dekat dengan horison peristiwa (Reynolds 2015)

### Eksperimen dan Observasi

Eksperimen Hafele-Keating dilakukan pada Oktober 1971 oleh Joseph C. Hafele dan Richard E. Keating (Mamay, Yochelson, and Dorf 1962). Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan jam atom cesium yang akurat hingga  $\pm 1$  detik dalam 300.000 tahun. Jam atom didalam pesawat terbang diterbangkan mengelilingi bumi. Eksperimen dilakukan untuk membandingkan waktu pada jam dipesawat dengan jam identik yang tetap di Observatorium Angkatan Laut AS (USNO) (Arneth 2024b). Hasilnya jam di pesawat bergerak lebih lambat karena kecepatan relatif bumi pada pesawat ke arah timur (searah rotasi bumi) dan jam bergerak lebih cepat karena medan gravitasi lemah pada pesawat ke arah barat (melawan rotasi bumi) (Pokhrel 2024). Eksperimen Hafele-Keating adalah salah satu bukti empiris yang mengkonfirmasi keberadaan dilatasi waktu. Eksperimen ini relevan untuk memahami perbedaan waktu pada misi antarbintang dengan kecepatan tinggi. Namun, kecepatan pesawat ( $10^{-6} c$ ) jauh lebih rendah dibandingkan kebutuhan misi antarbintang ( $0,15-0,2 c$ ), dan sensitivitas jam cesium tidak cukup untuk mendeteksi efek relativistik kecil pada jarak jauh. Selain itu, eksperimen ini tidak mempertimbangkan efek lingkungan kosmik seperti radiasi, yang signifikan dalam perjalanan antarbintang.

Muon adalah partikel elementer bermuatan  $m_\mu \approx 207m_e$  yang tercipta dari tumbukan proton berenergi tinggi lalu disimpan dalam ring magnetik (Swanson et al. 2025). Eksperimen ini dilakukan untuk membandingkan muon diam dengan muon relativistik (Casarsa, Lucchesi, and Sestini 2024). Hasil yang didapatkan dengan implementasi faktor lorentz yaitu muon relativistik yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya meluruh relatif lebih lambat dari pada muon diam (Masiero, Paradisi, and Passera 2020). Hasil tersebut menunjukkan dampak dilatasi waktu pada kecepatan tinggi atau mendekati kecepatan cahaya. Eksperimen muon di CERN menambah bukti empiris keberadaan dilatasi waktu. Eksperimen ini kuat dalam memverifikasi dilatasi waktu pada kecepatan tinggi, namun tantangannya adalah skalabilitas ke misi antarbintang, karena muon dihasilkan dalam kondisi laboratorium terkendali, bukan lingkungan ruang angkasa dengan radiasi kosmik dan variasi gravitasi.

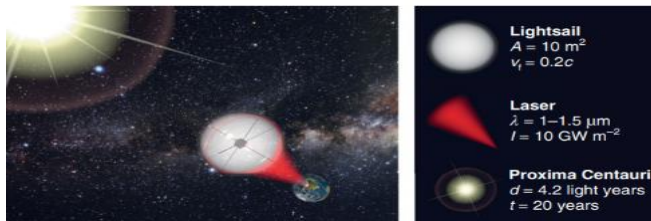
Hipotesis perjalanan ke proxima centauri merupakan studi teoritis tentang perjalanan antarbintang (Stavinschi, Garcia, and Sosa 2018). Proxima centauri merupakan bintang yang paling dekat dengan sistem tata surya, terletak 4,24 tahun cahaya dari bumi (Damasso et al. 2020). Simulasi perjalanan

tersebut dengan mengirimkan pesawat antariksa ke proxima centauri. Pesawat akan bergerak mendekati kecepatan cahaya. Simulasi numerik, analisis komparatif digunakan dalam simulasi ini. Hasil simulasi ini dapat disimpulkan pesawat yang bergerak mengalami dilatasi waktu, waktu yang dialami astronot selama perjalanan ke proxima centauri berlalu lebih singkat daripada waktu di bumi (Gianfelice and Wendt n.d.). Simulasi ini memberikan wawasan teoritis untuk misi antarbintang, seperti perencanaan durasi misi dan efek pada awak. Namun, keterbatasannya adalah sifat teoritis tanpa pengujian empiris. Teknologi propulsi untuk mencapai kecepatan relativistik belum matang, dan efek fisiologis atau psikologis dilatasi waktu pada awak belum dipelajari secara mendalam, membatasi aplikasinya dalam misi berawak.

Shapiro Delay Effect merupakan fenomena relativistik di mana sinyal elektromagnetisme (Carson and Yagi 2020), seperti gelombang radio atau cahaya, saat melewati medan gravitasi yang kuat, seperti dekat pada bintang-bintang masif atau lubang hitam terjadinya penundaan waktu (Shapiro 1964) Efek shapiro delay dilakukan dengan tujuan untuk memverifikasi prediksi relativitas umum dalam kondisi medan gravitasi kuat (Will 2014). Pengujian efek ini dilakukan dengan mengukur waktu tempuh sinyal radio yang dikirim dari Bumi ke antariksa atau planet saat sinyal melintasi medan gravitasi kuat, seperti dekat matahari (Milani et al. 2002) Hasil pengujian efek Shapiro Delay menunjukkan bahwa penundaan sinyal sesuai dengan prediksi relativitas umum (Carson and Yagi 2020). Efek ini relevan untuk komunikasi antarbintang, di mana sinyal dapat melintasi medan gravitasi bintang masif. Namun, pengujian terbatas pada medan gravitasi lemah (Matahari), bukan kondisi ekstrem seperti dekat lubang hitam. Stabilitas sinyal pada jarak antarbintang juga sulit dipertahankan, dan pengukuran memerlukan instrumentasi yang sangat presisi, menambah tantangan teknis.

Konsep time vaults mengacu pada teknologi masa depan yang menggunakan ekspansi gravitasi, terutama yang dekat dengan benda raksasa seperti lubang hitam dan bintang neutron, dan menyimpan informasi, benda, atau bahkan manusia dalam kerangka waktu yang lebih lambat dibandingkan dengan luar. Tujuan utama pengembangan konsep "time vaults" adalah untuk memanfaatkan prinsip dilatasi waktu gravitasi untuk melindungi data, teknologi, dan bahkan manusia dari dampak perjalanan waktu di luar angkasa (Stairs 2003) Konsep ini dirancang untuk memungkinkan sistem di dalam gudang untuk melaksanakan misi antarbintang dalam jangka waktu yang jauh lebih pendek, meskipun waktu di Bumi mencapai puluhan atau ratusan tahun. Hasil penelitian teoritis menunjukkan bahwa "time vaults " dapat

membuat perbedaan waktu yang signifikan. Misalnya, satu tahun di brankas dekat lubang hitam dapat sebanding selama beberapa dekade (Carson and Yagi 2020). Simulasi orbital di sekitar bintang neutron menunjukkan bahwa meskipun tantangan teknis masih menjadi tantangan utama, mereka dapat menjaga keamanan dalam orbit yang stabil dengan ekstensi waktu yang terukur (Arzoumanian et al. 2009).



### Implikasi Teknologi untuk Misi Antarbintang Kendaraan relativistik (Breakthrough starshot)

**Gambar 2.** Vision for the Starshot nanocraft. A phased array of lasers, or a light beamer, will propel the nanocraft towards Proxima Centauri (Davoyan et al. 2021).

Kendaraan relativistik, seperti yang diusulkan dalam inisiatif Breakthrough Starshot, adalah wahana antariksa berupa nanocraft dengan layar foton ultraringan berbahan grafena atau polimer canggih, yang didorong oleh array laser berbasis Bumi berkekuatan 100 gigawatt untuk mencapai kecepatan 15-20% kecepatan cahaya, memungkinkan perjalanan ke sistem bintang terdekat seperti Alpha Centauri dalam 20-30 tahun waktu Bumi (Helvajian et al. 2023). Dengan massa hanya beberapa gram, kendaraan ini dirancang untuk misi tanpa awak, membawa kamera dan sensor miniatur yang tahan radiasi kosmik untuk mengumpulkan data ilmiah, seperti gambar dan pengukuran lingkungan dari exoplanet seperti Proxima (Heller, Hippke, and Kervella 2017).

Teknologi ini memanfaatkan efek dilatasi waktu kecepatan tinggi, di mana waktu proper onboard jauh lebih pendek dibandingkan waktu Bumi, sehingga mempersingkat durasi misi secara subjektif (Will 2014). Implementasinya melibatkan desain layar foton setebal beberapa nanometer untuk menahan tekanan radiasi laser, dengan navigasi menggunakan sinyal laser dan algoritma relativistik untuk mengoreksi lintasan serta memperhitungkan efek dilatasi waktu (Stankovich et al. 2006).

Implikasi jangka panjang mencakup pengembangan material tahan radiasi yang lebih canggih dan sistem komputasi kuantum untuk memproses data onboard, membuka peluang untuk eksplorasi ruang angkasa jarak jauh yang lebih efisien

dan membawa manusia lebih dekat ke era kolonisasi antar bintang (Long et al., 2012).

### Jam atom presisi tinggi

Jam atom presisi tinggi, seperti jam optik berbasis ytterbium atau strontium dengan akurasi hingga  $10^{-18}$  detik, adalah teknologi kunci untuk navigasi dan sinkronisasi lintasan dalam misi antar bintang, yang mampu mengatasi efek dilatasi waktu akibat kecepatan tinggi atau medan gravitasi kuat sehingga memastikan waktu proper onboard tetap selaras dengan kebutuhan misi (Ludlow et al. 2015). Digunakan dalam kendaraan relativistik seperti Breakthrough Starshot atau wahana berawak, jam ini memungkinkan pengukuran waktu yang sangat akurat untuk menentukan posisi dan lintasan di ruang antargalaksi, di mana sinyal dari Bumi tertunda hingga bertahun-tahun (Bothwell, 2024; Helvajian et al., 2023); Mengandalkan transisi optik pada atom yang didinginkan hingga mendekati nol absolut menggunakan laser, memastikan stabilitas dalam lingkungan ekstrem seperti radiasi kosmik, dan diintegrasikan dengan algoritma relativistik untuk mengoreksi pergeseran waktu akibat kecepatan hingga  $0.2c$  atau gravitasi dekat objek masif seperti bintang neutron (Chien 2022). Tujuannya adalah untuk mendukung navigasi presisi ke sistem bintang seperti Alpha Centauri, memungkinkan sinkronisasi sinyal komunikasi laser yang kritis untuk misi tanpa awak atau berawak, serta menguji relativitas umum dalam kondisi ruang angkasa (Helvajian et al. 2023; Milani et al. 2010).

Implementasinya melibatkan desain jam atom yang ringkas dan tahan radiasi, dilindungi oleh pelindung berbasis grafena, dengan pengujian laboratorium menunjukkan ketahanan terhadap getaran dan radiasi, meskipun miniaturisasi untuk nanocraft tetap menjadi tantangan (Stankovich et al., 2006; Ludlow et al., 2015). Hasil pengujian menunjukkan bahwa jam optik dapat mempertahankan akurasi di lingkungan antar bintang, memungkinkan koreksi lintasan dengan presisi sub-meter dan sinkronisasi komunikasi laser meskipun penundaan sinyal antar bintang, sementara implikasi jangka panjang mencakup pengembangan jam kuantum untuk misi yang lebih kompleks dan integrasi dengan sistem otonom AI untuk navigasi. (Jain et al. 2024) (Bothwell 2024).

### Sistem otonom dan AI untuk komunikasi tanpa ketergantungan Bumi

Sistem otonom berbasis kecerdasan buatan (AI) dirancang untuk memungkinkan wahana antariksa, seperti kendaraan relativistik atau pesawat berawak dalam misi antar bintang, beroperasi secara independen tanpa komunikasi real-time dengan Bumi, mengatasi penundaan sinyal yang bisa mencapai bertahun-tahun akibat jarak antar bintang hingga 4,24 tahun cahaya ke

Alpha Centauri (Chien 2022; Doris 2025 )Menggunakan model pembelajaran mesin adaptif, sistem AI ini mengelola navigasi presisi, komunikasi laser, dan diagnostik onboard, memproses data dari sensor seperti kamera dan spektrometer untuk mendeteksi anomali seperti radiasi kosmik atau efek gravitasi kuat, serta mengoptimalkan sumber daya seperti energi dan bandwidth komunikasi dalam lingkungan relativistik (Shah and Khan 2024;Chien 2022).

Teknologi ini, yang telah diuji pada Mars rovers seperti Perseverance, bertujuan untuk memastikan keandalan misi ke sistem bintang seperti Proxima Centauri dengan mengambil keputusan otonom. Hal ini bertujuan untuk menyesuaikan lintasan berdasarkan algoritma relativistik yang memperhitungkan dilatasi waktu kecepatan tinggi hingga 0.2c atau pergeseran merah gravitasi (Doris 2025); Will, 2023). Implementasinya melibatkan chip neuromorfik atau komputasi kuantum untuk efisiensi energi, penyimpanan data kuantum untuk menangani informasi jangka panjang, dan protokol komunikasi laser adaptif yang mengoreksi distorsi sinyal akibat efek relativistik, dengan pengujian dilakukan melalui simulasi misi antar bintang dan eksperimen di orbit Bumi rendah (Preskill, 2020; Lvovsky, Sanders, & Tittel, 2020).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa AI otonom dapat melakukan navigasi dengan akurasi sub-meter dan mendeteksi anomali dalam kondisi simulasi ruang angkasa, sementara komunikasi laser memungkinkan transmisi data meskipun penundaan sinyal signifikan, dengan implikasi jangka panjang mencakup pengembangan AI yang belajar secara adaptif untuk lingkungan tak dikenal dan integrasi dengan jam atom presisi tinggi untuk sinkronisasi waktu, memperkuat kemampuan misi antar bintang tanpa ketergantungan Bumi. (Chien 2022; John J Degnan 2008; Helvajian et al. 2023).

Tabel 2. Ringkasan temuan utama

| ASPEK      | Temuan                                                                     | Penulis                                       |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Eksperimen | Hafele-Keating, peluruhan muon, Shapiro Delay memverifikasi dilatasi waktu | Arneth, M. B.                                 |
| Teknologi  | Jam atomik, Breakthrough Starshot, sistem AI memitigasi efek               | Ludlow, A. D., et al.; Turyshv, S. G., et al. |

|              |                                                         |                                        |
|--------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Aplikasi     | Navigasi, komunikasi, sinkronisasi                      | Degnan, J. J.; Chow, S. C.             |
| Implementasi | Mayoritas simulasi, jam atom diuji pada perangkat keras | Bothwell, T., et al.; Toth, L., et al. |

Kesimpulan

Berdasarkan kajian komprehensif, studi ini menyimpulkan bahwa dilatasi waktu, diverifikasi oleh eksperimen seperti Hafele-Keating dan Shapiro Delay berdambak signifikan pada sinkronisasi waktu dan navigasi antariksa. Untuk mengatasi efek dilatasi waktu inovasi teknologi seperti kendaraan relativistik Breakthrough Starshot, jam atom presisi tinggi, dan sistem AI otonom telah dikembangkan. Temuan teknologi ini mendukung navigasi presisi, sinkronisasi waktu, dan komunikasi antarpesawat. Teknologi yang dikembangkan masih berfokus pada simulasi, meskipun jam atom telah diuji pada perangkat keras nyata. Penelitian lanjutan harus berfokus pada pengembangan prototipe Breakthrough Starshot dan simulasi laboratorium untuk sistem navigasi berbasis AI guna merealisasikan eksplorasi antarbintang. Kontribusi asli penelitian ini terletak pada sintesis bukti empiris dan kemajuan teknologi untuk menyediakan kerangka kerja yang komprehensif untuk mengurangi dilatasi waktu dalam misi antarbintang. Namun, keterbatasan yang ada termasuk akses terbatas ke beberapa artikel berbayar dan fokus pada sumber-sumber berbahasa Inggris, yang berpotensi mengabaikan studi non-Inggris yang relevan. Penelitian di masa depan harus memprioritaskan pengembangan dan pengujian prototipe Breakthrough Starshot dalam kondisi dunia nyata, meningkatkan navigasi berbasis kecerdasan buatan melalui simulasi laboratorium, dan mengeksplorasi adaptasi biologis untuk memajukan kelayakan eksplorasi antarbintang.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Sriwijaya.

Daftar Pustaka

Arneth, Borros. 2024a. "A Novel Interpretation of the Results of the Hafele-Keating Experiment." *Physics Essays* 37(2): 150–52. <https://doi.org/doi.org/10.4006/0836-1398-37.2.150>

Arneth, Borros. 2024b. *Hafele and Keating Revisited: A Novel Interpretation of the Results of the Hafele-Keating Experiment*. Physics Essays 210

- Publication. doi: <https://doi.org/doi.org/10.4006/0836-1398-37.2.150>
- Arzoumanian, Z, S Bogdanov, James Cordes, Keith Gendreau, Dong Lai, J Lattimer, B Link, et al. 2009. "X-Ray Timing of Neutron Stars, Astrophysical Probes of Extreme Physics."
- Atwater, Harry A, Artur R Davoyan, Ognjen Ilic, Deep Jariwala, Michelle C Sherrott, Cora M Went, William S Whitney, and Joeson Wong. 2018. "Materials Challenges for the Starshot Lightsail." *Nature Materials* 17(10): 861–67. doi:<https://doi.org/doi.org/10.1038/s41563-018-0075-8>.
- Bothwell, Tobias. 2024. "Prospective Optical Lattice Clocks in Neutral Atoms with Hyperfine Structure." *Atoms* 12(3). doi: <https://doi.org/doi.org/10.3390/atoms12030014>.
- Bruiger, Dan. 2024. "Light and the Cosmic Speed Limit." (August). doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26649.63848>.
- Carson, Zack, and Kent Yagi. 2020. "Testing General Relativity with Gravitational Waves." In *Handbook of Gravitational Wave Astronomy*, eds. Cosimo Bambi, Stavros Katsanevas, and Konstantinos D Kokkotas. Singapore: Springer Singapore, 1–33. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4702-7\\_41-1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4702-7_41-1).
- Casarsa, Massimo, Donatella Lucchesi, and Lorenzo Sestini. 2024. "Experimentation at a Muon Collider." *Annual Review of Nuclear and Particle Science*: 233–61. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102622-011319>.
- Chien, Steve A. 2022. *Formal Methods for Trusted Space Autonomy: Boon or Bane?*. <https://ai.jpl.nasa.gov>.
- Damasso, Mario, Fabio Del Sordo, Guillem Anglada-Escudé, Paolo Giacobbe, Alessandro Sozzetti, Alessandro Morbidelli, Grzegorz Pojmanski, et al. 2020. "A Low-Mass Planet Candidate Orbiting Proxima Centauri at a Distance of 1.5 AU." *Science Advances* 6(3): 1–13. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax7467>.
- Davoyan, Artur R., Jeremy N. Munday, Nelson Tabiryan, Grover A. Swartzlander, and Les Johnson. 2021. "Photonic Materials for Interstellar Solar Sailing." *Optica* 8(5): 722. doi: <https://doi.org/10.1364/optica.417007>.
- Degnan, John J. 2008. "Laser Transponders for High-Accuracy Interplanetary Laser Ranging and Time Transfer." In *Lasers, Clocks and Drag-Free Control: Exploration of Relativistic Gravity in Space*, eds.
- Hansjorg Dittus, Claus Lammerzahl, and Slava G Turyshev. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 231–42. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-34377-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-540-34377-6_11).
- Doris, Lucas. 2025. "AI in Space Exploration: Autonomous Systems for Planetary Rovers and Satellite Data Analysis."
- Gianfelice, Eliana, and Wendt. "Introduction to Special Relativity." <https://doi.org/doi.org/10.48550/arXiv.2108.10099>.
- Garcia, A. C. M., Schneiders, M., da Mota, K. S., da Conceição, V. M., & Kissane, D. W. (2023). Demoralization and spirituality in oncology: an integrative systematic review. *Supportive Care in Cancer*, 31(5). <https://doi.org/doi.org/10.1007/s00520-023-07722-6>
- Heller, René, Michael Hippke, and Pierre Kervella. 2017. "Optimized Trajectories to the Nearest Stars Using Lightweight High-Velocity Photon Sails." doi: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa813f>.
- Helvajian, Henry, Alan Rosenthal, John Poklemba, Thomas A. Battista, Marc D. DiPrinzio, Jon M. Neff, John P. McVey, Viktor T. Toth, and Slava G. Turyshev. 2023. "Mission Architecture to Reach and Operate at the Focal Region of the Solar Gravitational Lens." *Journal of Spacecraft and Rockets* 60(3): 829–47. doi: <https://doi.org/10.2514/1.A35493>.
- Jain, Rashika, Stefano Speretta, Dominic Dirkx, and Eberhard Gill. 2024. "Inter-Satellite Tracking Methods and Applications: A Comprehensive Survey." *Advances in Space Research* 74(8): 3877–3901. doi: <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.asr.2024.08.022>
- Joseph, Capt, and H Cass Forrington. 2023. "General Relativity: Effects in Time as Causation." (February).
- Kotur, Bhargava R, and Adin Softlabs. "Special Relativity's Time Dilation Is Wrong No Time Dilation Due to Velocity.": 1–38.
- Long, K, Adam Crawl, Andreas Tziolas, and R.Freeland. 2012. "Project Icarus: Nuclear Fusion Space

- Propulsion & The Icarus Leviathan Concept." *Space Chronicles* 65: 44.
- Ludlow, Andrew D, Martin M Boyd, Jun Ye, E Peik, and P.O. Schmidt. 2015. "Optical Atomic Clocks." *Reviews of Modern Physics* 87(2): 637-701. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.637>.
- Mamay, S H, E L Yochelson, and E Dorf. 1962. "72 Science Hafele Keating --- Around-the-World Atomic Clocks- Observed Relativistic Time Gains." 177.
- Masiero, A., P. Paradisi, and M. Passera. 2020. "New Physics at the MUonE Experiment at CERN." *Physical Review D* 102(7): 75013. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.075013>.
- Milani, A, Giacomo Tommei, David Vokrouhlický, Emanuele Latorre, and S Cicalò. 2010. "Relativistic Models for the BepiColombo Radioscience Experiment." In *Proceedings of The International Astronomical Union*. 356-65. doi: <https://doi.org/10.1017/S1743921309990652>.
- Milani, A, David Vokrouhlický, Daniela Villani, Claudio Bonanno, and Alessandro Rossi. 2002. "Testing General Relativity with the BepiColombo Radio Science Experiment." *Physical Review D* 66. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.66.082001>.
- Neukart, Florian. 2024. "Toward the Stars: Technological, Ethical, and Sociopolitical Dimensions of Interstellar Exploration." *Space Policy* (November): 101676. doi: <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2024.101676>.
- Noer, Zikri. & Dayana. 2021. *Buku Teori Relativitas*. Guepedia.
- Peretz, E., Mather, J. C., Hamilton, C., Pabarcus, L., Hall, K., Fugate, R. Q., Green, W. A., & Klupar, P. (2022). Orbiting laser configuration and sky coverage: coherent reference for Breakthrough Starshot ground-based laser array. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 8(01). <https://doi.org/doi.org/10.1117/1.jatis.8.1.017004>
- Pokhrel, Sakinah. 2024. "No TitleEAENH." *Ayan* 15(1): 37-48.
- Reynolds, Christopher S. 2015. "Measuring Black Hole Spin Using X-Ray Reflection Spectroscopy." In *The Physics of Accretion onto Black Holes*, eds. Maurizio Falanga, Tomaso Belloni, Piergiorgio Casella, Marat Gilfanov, Peter Jonker, and Andrew King. New York, NY: Springer New York, 277-94. doi: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2227-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2227-7_14).
- Shah, Varun, and Danial Khan. 2024. "Next-Generation Space Exploration: AI-Enhanced Autonomous Navigation Systems".
- Shapiro, Irwin I. 1964. "Fourth Test of General Relativity." *Physical Review Letters* 13(26): 789-91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.
- Stairs, Ingrid H. 2003. *Testing General Relativity with Pulsar Timing Living Reviews in Relativity Article Amendments*. <https://www.livingreviews.org/lrr-2003-5/>.
- Stankovich, Sasha, Dmitriy A. Dikin, Geoffrey H.B. Dommett, Kevin M. Kohlhaas, Eric J. Zimney, Eric A. Stach, Richard D. Piner, Son Binh T. Nguyen, and Rodney S. Ruoff. 2006. "Graphene-Based Composite Materials." *Nature* 442(7100): 282-86. doi: <https://doi.org/10.1038/nature04969>.
- Stavinschi, Magda, Beatriz Garcia, and Andrea Sosa. 2018. "Tata Surya." *Jurnal Prodi Astronomi Bandung*: 73.
- Swanson, E., M. Fertl, A. Garcia, C. Helling, R. Ortez, R. Osofsky, D. A. Peterson, et al. 2025. "The Fixed Probe Storage Ring Magnetometer for the Muon G-2 Experiment at Fermi National Accelerator Laboratory." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1075(March): 170338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170338>.
- Vijayan, Aditi, Bocheng Zhu, Miao Li, Feng Yuan, and Luis C Ho. 2023. "X-Ray Emission from the Interstellar and Circumgalactic Medium of Elliptical Galaxies Based on Macer Simulations." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 524(3): 4642-52. doi: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad2107>
- Will, Clifford M. 2014. "The Confrontation between General Relativity and Experiment." doi: <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.