

# **LA POSSIBILITAT DE VIATJAR EN EL TEMPS**

**TREBALL DE RECERCA  
BRUNO GIMÉNEZ RODRÍGUEZ**

**201**

**FÍSICA**

**ANA JUSTO I GISELA GARCIA**

**INS PUIG CASTELLAR**

**13/1/2023**

«Fins i tot si resulta que viatjar en el temps és impossible, és important que entenguem per què és impossible.»

Stephen Hawking

## RESUMEN

Los viajes en el tiempo siempre han sido un tema abierto a la discusión en torno a su posibilidad. Se están haciendo más y más investigaciones y experimentos respecto a ellos y cada vez es un tópico más recurrente tanto en series de televisión como en películas.

Este trabajo tiene como pregunta de investigación si es posible o no viajar en el tiempo. El objetivo es conocer todo lo que lo envuelve y ver más a fondo de qué manera aparecen en las películas y cómo son tratados desde una visión científica.

La primera parte del trabajo, la teórica, se basa en una búsqueda bibliográfica a partir de libros, como *Agujeros negros y tiempo curvo* o *Hiperespacio*, páginas web, otros trabajos de fin de grado y vídeos o documentales. A partir de esta, y pasando por la teoría de la relatividad especial, las paradojas, la relatividad general, los agujeros negros y los agujeros de gusano, se pueden explicar al final de esta parte los viajes al futuro y al pasado y su respectiva viabilidad.

En la segunda parte, de carácter práctico, se aplican los conocimientos adquiridos durante el trabajo para analizar los viajes en el tiempo en las películas *Regreso al Futuro* e *Interstellar*. El análisis se efectúa tanto de manera cualitativa como cuantitativa, haciendo diversos cálculos, utilizando información y conceptos tratados anteriormente en el marco teórico, para medir la veracidad de las películas, entendiendo que también han de velar por hacer la trama lo más atractiva posible.

La conclusión más destacable es que sí se puede viajar en el tiempo, tanto hacia el futuro como hacia el pasado, aunque en este último de manera práctica es mucho más complicado. También cabe destacar como conclusión que mientras que en *Regreso al Futuro* encontraremos algunos errores en cuanto al viaje al futuro, *Interstellar* se ajusta casi perfectamente a las premisas científicas y hace de ella una película aún más interesante.

## ABSTRACT

Time travel has always been a topic open to discussion, whether they are or not possible. More and more research and experiments towards that topic are being made each year. Time travel is becoming a more recurring topic in TV series and films.

This project questions whether time travel is possible or not. The main objective is to know everything surrounding this topic and see how it appears in films and how they are treated from a scientific basis.

The first part of the research, the theoretical one, is based on a bibliographic search based on books, such as *Black Holes and Time Wraps*, web pages, some TFG and videos or documentaries. From this, and going through special relativity, paradoxes, general relativity, black holes and wormholes, we will be able to explain time travel to the future and to the past.

In the second part, the acquired knowledge will be applied to analyze the time travel in two films: *Interstellar* and *Back to the future*. The analysis will be done qualitatively and quantitatively, doing some calculations to see the truthfulness of the films, understanding that they also have to look for the plot and do it as attractive as possible.

The most important conclusion is that time travel is possible, to the future and to the past, with a little shade in the last one. It is also important to highlight as a conclusion that, meanwhile *Back to the future* has some mistakes, *Interstellar* adjusts perfectly to its scientific premises, a trait that makes it an even more interesting film.

# ÍNDEX

<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>1</b>
1.1. Motivacions	1
1.2. Objectius i hipòtesis	1
1.3. Metodologia	2
<b>MARC TEÒRIC</b>	<b>4</b>
<b>2. INTRODUCCIÓ ALS VIATGES EN EL TEMPS</b>	<b>4</b>
<b>3. PARADOXES: LA PARADOXA DE L'AVI I LA PARADOXA DELS GERMANS BESSONS</b>	<b>6</b>
3.1 La paradoxa de l'avi	6
3.2. La paradoxa dels germans bessons	7
<b>4. RELATIVITAT GENERAL: CONCEPTES BÀSICS</b>	<b>9</b>
4.1. Relativitat especial	9
4.2. Vincle entre ambdues teories: el principi d'equivalència	11
<b>5. RELATIVITAT GENERAL: FORATS NEGRES I FORATS DE CUC</b>	<b>17</b>
5.1 Forats negres	17
5.2 Forats de cuc	20
<b>6. VIATJAR AL FUTUR</b>	<b>22</b>
<b>7. VIATJAR AL PASSAT</b>	<b>24</b>
<b>8. MARC PRÀCTIC: ANÀLISI DE PEL·LÍCULES</b>	<b>27</b>
8.1. Retorn al futur (Back to the future)	29
8.1.1 Argument	29
8.1.2 Viatge en el temps a la pel·lícula	30
8.1.3 Anàlisi	30
8.2 Interstellar	33
8.2.1 Argument	33
8.2.2 Viatge en el temps a la pel·lícula	34
8.2.3 Anàlisi	34
<b>9. CONCLUSIONS</b>	<b>39</b>
<b>10. AGRAÏMENTS</b>	<b>41</b>
<b>11. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA</b>	<b>42</b>

# 1. INTRODUCCIÓ

El tema escollit per tal d'elaborar el treball de recerca ha estat els viatges en el temps. Es considera que viatgem en el temps quan ens movem, cap endavant o cap enrere d'un punt a un altre en el temps. Si són possibles o no sempre ha estat una gran incògnita durant la història de la humanitat, però sembla que cada vegada ens acostem més a saber si és viable viatjar en el temps.

## 1.1. Motivacions

Des de ben petit m'ha agradat saber més sobre les coses que normalment no tenen una resposta ferma i sobre les quals hi ha cert debat entorn de la seva validesa. Si aquestes eren de caràcter científic, encara m'entusiasmaven més. Veure diversos vídeos que parlaven sobre els viatges en el temps, en concret uns del canal de divulgació científica anomenat Quantum Fracture a YouTube, i el meu interès previ a quelcom relacionat amb la ciència i, sobretot, amb l'espai, ha fet que esculli aquest tema. Un tema que, tot i que tinc unes nocions molt bàsiques sobre ell, desconec. Això em motiva encara més a continuar veient vídeos i llegint llibres i articles relacionats amb aquesta qüestió. Durant el treball, ha sorgit una altra motivació a partir de veure pel·lícules on es tracten els viatges en el temps. Aquesta, a més, esdevindrà en una futura part pràctica.

## 1.2. Objectius i hipòtesis

Quant als objectius del treball, n'hi ha un de clar: aconseguir determinar si és possible o no efectuar un viatge en el temps, tant de manera teòrica com pràctica. A més, la finalitat de la part pràctica és veure com es tracten els viatges en el temps en el món cinematogràfic.

L'objectiu és arribar a tractar la possibilitat de viatjar de manera gradual, és a dir, dels aspectes més senzills fins als més complexos que ens permetrà analitzar la

possibilitat dels viatges en el temps. D'aquests aspectes es puntualitzarà en els punts cabdals i necessaris per al treball.

Les meves hipòtesis, potser influenciades per les petites cerques fetes fins al moment, són les següents:

- És possible viatjar al futur, tant teòricament (sobre el paper) com pràcticament (portant allò que es planteja a un escenari real).
- Només és viable viatjar al passat de forma teòrica.

Durant el desenvolupament del treball s'aniran resolent algunes preguntes que sorgeixin amb la consulta de la bibliografia existent. A continuació s'exposen les preguntes inicials que motiven el present treball de recerca:

- Què és la relativitat general?
- Com s'origina un forat negre?
- Què permet un forat de cuc?

Aquestes preguntes tenen una relació directa amb els viatges en el temps. La primera, de la qual parlem a l'[apartat 4](#), és la teoria que sustenta gran part dels viatges en el temps. Després, tant els forats negres ([apartat 5.1](#)), com els forats de cuc ([apartat 5.2](#)) ens ofereixen maneres de viatjar en el temps i són, per tant, cabdals.

### **1.3. Metodologia**

Per poder arribar a una conclusió i afirmar o desmentir les hipòtesis fonamentaré el treball en una extensa recerca bibliogràfica, on es consultaran tant pàgines web de divulgació científica, com articles de revistes científiques i llibres. Els dos llibres que serviran per fer el primer gran aprofundiment en la matèria seran: *Hiperespacio*, de Michio Kaku i *Agujeros negros y tiempo curvo*, de Kip S. Thorne. Aquests dos llibres mencionen els aspectes generals de la teoria de la relativitat general, a partir de la qual es poden tractar els viatges en el temps. Aquests han estat els dos llibres

escollits perquè es tracten la majoria dels temes dels quals vull parlar al treball i, a més, segons diverses crítiques, s'explica d'una manera no gaire complexa. A més, contrastaré les idees extrems de les fonts bibliogràfiques amb diferents treballs de camps que s'han fet a grans laboratoris, com per exemple el que es va fer a l'Institut de Física de Moscou, on es va estudiar la probabilitat de fer que un electró viatgés al passat. Tot i tenir en compte aquests experiments, el gran cos d'informació del treball provindrà de la recerca bibliogràfica i a internet.



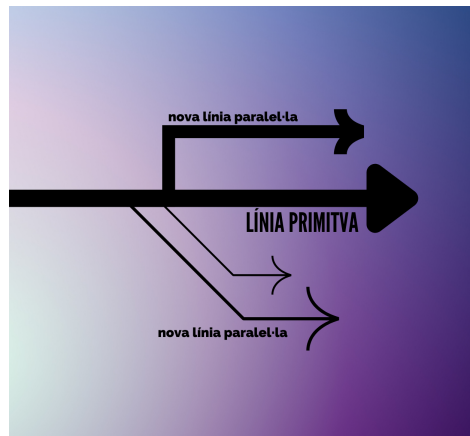
# MARC TEÒRIC

## 2. INTRODUCCIÓ ALS VIATGES EN EL TEMPS

En la comunitat científica, els viatges en el temps sempre ha estat un tema bastant controvertit, sobretot per les diferents postures que els diferents científics, principalment físics, han adoptat sobre el tema. Al llarg de la història han estat diversos científics de renom els que s'han pronunciat i han profunditzat en aquesta qüestió: el físic i matemàtic Isaac Newton (1643, Woolsthorpe Manor - 1727, Kensington), el físic Albert Einstein (1879, Ulm - 1955, Princeton), el matemàtic Kurt Gödel (1906, Brno - 1978, Princeton) o Kip S. Thorne (1940, Logan, Utah) en són alguns, i d'ells parlarem en aquest primer apartat. Primer, hem de tractar un concepte introduït pel físic alemany anomenat "línia de l'univers", que és la trajectòria que recorre quelcom en l'espai-temps. La nostra pròpia línia de l'univers la formem amb cada acció que fem des que es forma, quan tant la línia d'univers del nostre pare i la nostra mare es creuen, formant la nostra. Per Newton, el temps és com una fletxa recta, i no hi ha res que la pugui desviar. Per Einstein i Gödel era ben diferent. Pel primer, el temps és com un riu cabalós que avançava lentament, tot seguint la seva trajectòria, però a diferència de Newton, aquest riu, com qualsevol, pot formar afluents (altres línies de l'univers). Per Gödel, aquest riu es podia deformar cap enrere en cercles, formant remolins i vòrtex, fent una clara referència als viatges en el temps. Gödel ens deia que era possible viatjar al passat. I com ens diu Michio Kaku (1947, San José) al llibre divulgatiu *Hiperespacio*, el fet de tornar al passat no alteraria la línia de l'univers, com ja va dir Einstein<sup>1</sup>, ja que aquestes no poden tallar-se ni acabar, sinó que el que estaríem fent seria crear una altra línia d'univers paral·lela a la primitiva o original, tal com es veu a la següent imatge:

---

<sup>1</sup> L'any 2019 a l'Institut Perimeter de Física Teòrica de el Canadà, els científics Jacob Hauser i Barak Shoshany van ratificar la tesi d'Einstein.



**Imatge 1.** Línies de l'univers (primitiva i paral·leles). Font pròpia

Podem veure com Newton és el més conservador respecte la idea de pertorbar el temps, potser per ser el més arcaic dels tres. En canvi, el fet de ser el més actual, no fa que el físic Stephen Hawking (1942, Oxford - 2018, Cambridge) estigui totalment obert als viatges en el temps. Tot i que confirma que de manera teòrica són possibles, es mostra escèptic davant la possibilitat d'efectuar els viatges de manera experimental, ja que com ell diu, no creu possible el viatge en el temps perquè "no hem estat envaïts per una horda de turistes procedents del futur", diu l'anglès. Qui sí que veia possible construir una màquina del temps, primer teòricament i després portada a la realitat, era Thorne. L'any 1988, ell ,juntament amb altres físics, va fer la primera proposta seriosa d'una màquina del temps. Aquesta màquina es basava en un forat de cuc que, aquest cop, s'havia de crear, cosa que avui dia no sembla possible. Tot i que l'experiment complia i entrava dins les lleis de la física, Thorne va deixar clar que per poder arribar a dominar els forats de cuc d'aquesta manera, l'experiment ha de ser executat per una "civilització arbitràriament avançada". Les lleis de la física ens diuen què és possible, no què és pràctic, per tant, encara queda perquè això sigui possible i qui sap si s'ha de fer en un escenari no terrícol. Com veiem, la part més crítica dels viatges en el temps és la pràctica o experimental. Aquesta també presenta un problema molt difícil de tractar i tenir en compte, les paradoxes.

### 3. PARADOXES: LA PARADOXA DE L'AVI I LA PARADOXA DELS GERMANS BESSONS

Una paradoxa és una idea contradictòria des del punt de vista lògic, i en els viatges en el temps en trobem varies. En aquest apartat tractarem dues concretament: la paradoxa de l'avi, que tracta els viatges al passat i la dels germans bessons, on veurem els viatges al futur i la relativitat d'Einstein.

#### 3.1 La paradoxa de l'avi

La més coneguda és la de l'avi, on nosaltres viatgem al passat i matem el nostre avi. Això fa que el nostre pare mai neixi i, per tant, nosaltres tampoc. Si nosaltres no naixem, qui hauria matat l'avi?



**Imatge 2.** La paradoxa de l'avi. Font pròpia.

Això crea una contradicció sense una solució o explicació. A l'apartat anterior hem vist com Hawking era bastant reticent a la idea dels viatges en el temps, per això davant les dificultats que presenten les paradoxes, Hawking postula la seva conjectura de protecció temporal. A aquesta diu que la solució al problema de les paradoxes és que els viatges en el temps no existeixen i, en conseqüència, les paradoxes que en són provocades tampoc. Respecte a les paradoxes, també trobem el principi d'autoconsistència de Novikov, que diu que si viatgem enrere en el

temps, deu ser físicament impossible alterar res. A més, com hem vist a l'apartat anterior, en viatjar al passat, estaríem viatjant al passat d'un altre univers, ja que en fer-ho es crearia una altra línia de l'univers.

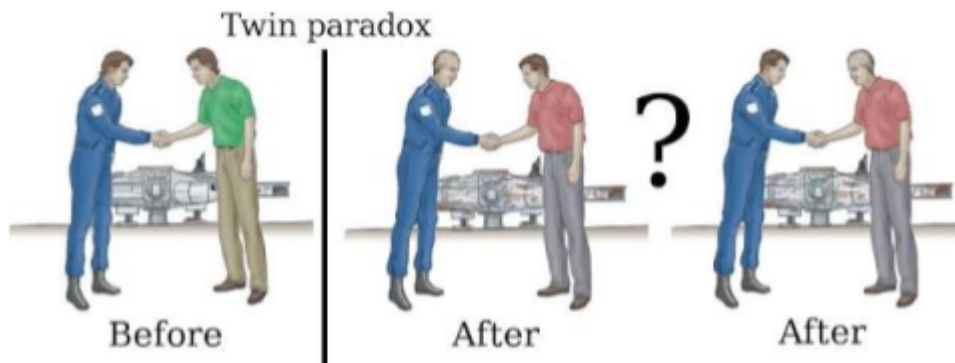
### **3.2. La paradoxa dels germans bessons**

En l'actualitat s'empra la teoria de la relativitat general com a base quan es parla de viatges en el temps. La teoria que la preval, la relativitat especial d'Einstein, es veu exemplificada amb una altra paradoxa: la dels germans bessons.

Abans d'explicar la paradoxa en si mateixa, parlarem d'un concepte cabdal. El primer que hem d'entendre és la relativitat del moviment, per exemple, quan marxem en tren i veiem la gent a l'andana, ens sembla que són ells els que s'allunyen de nosaltres. En canvi, per ells, som nosaltres amb el tren els que ens allunyem. Tornant a la paradoxa, a aquesta trobem, com el seu propi nom indica, a dos germans. Un d'ells viatja amb una nau espacial a una estrella molt llunyana. Quan viatgem a velocitats properes a la de la llum, i això és un dels pilars de la teoria de la relativitat, el temps tendeix a dilatar-se, és a dir, tendeix a passar més a poc a poc<sup>2</sup>. Per tant, quan el germà que viatja amb la nau torna, troba com el germà que havia romàs a la Terra és més vell que ell, fruit de la distorsió espai-temporal. Però fins aquí no hi ha cap paradoxa, gràcies a la relativitat i diverses comprovacions que s'han fet, podem dir amb fermesa que el germà que ha viatjat a l'estrella és més jove que l'altre. La vertadera paradoxa la trobem quan parlem de la relativitat del moviment. Per entendre-ho, hem d'associar-ho amb l'exemple del tren abans mencionat. I si el germà que viatja en la nau pensa que és la Terra, amb el seu germà, la que s'allunya d'ell? Si això fos així, qui s'hauria mogut hagués estat el germà de la Terra, aleshores, aquest, hauria de ser més jove que el germà de la nau en haver viatjat a grans velocitats.

---

<sup>2</sup> Aquest fenomen, anomenat dilatació temporal, es demostra a la pàgina web de Hyperphysics. Dilatación del tiempo [en línia]. Hyperphysics, 15 de gener de 2018 [Consultat: 16 de setembre de 2022]. Disponible a: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Relativ/tdil.html>>



Imatge 3. La paradoxa dels germans bessons. Imatge extreta de <https://weirdphysics.wordpress.com/2017/06/19/twin-paradox/>

La solució la va aportar el mateix Einstein, dient que la seva relativitat especial només funciona per a sistemes inercials, on no hi ha acceleració, la qual sí que apareix a aquesta paradoxa. Quan el germà torna cap a la Terra, ha de desaccelerar, donar la volta i tornar a accelerar per finalment tornar a la Terra. Però, per què en aquest cas no està subjecte a la interpretació de cada germà? Doncs per l'acceleració. Hem de pensar quan un cotxe accelera, nosaltres notem com el seient exerceix una força que fa que ens movem cap endavant. Aquesta força, aquesta empenta és la que fa que siguem conscients que ens estem movent. Així doncs, tornant a la paradoxa, quan el germà que viatja en la nau i accelera aquesta, sent l'empenta que fa el seient contra ell i, d'aquesta manera sap que és ell qui s'està movent i no la Terra la que s'allunya. Llavors, ens adonem que no hi ha paradoxa, el germà que viatja tornarà més jove que el que ha romàs a la Terra, no hi ha més.

## 4. RELATIVITAT GENERAL: CONCEPTES BÀSICS

Deixant de banda aquestes paradoxes, per poder comprendre el que és necessari per poder viatjar en el temps, hem de remuntar-nos a la base de tot això: la teoria de la relativitat especial i general, ambdues constituïdes per Einstein.

### 4.1. Relativitat especial

Einstein va estudiar sota la física newtoniana, les bases de la qual van ser establertes per Newton al segle XVII. Einstein, però, a mesura que els seus coneixements dins la física anaven creixent, va començar a pensar que la física descrita per Newton trontollava en algunes parts. L'aspecte clau va ser el temps i l'espai absolut que definia Newton en el seu univers de tres dimensions, on, segons ell, el temps flueix forçosament i necessàriament cap endavant i tothom està d'acord en la llargada, amplada i alçada de qualsevol objecte. Einstein trenca amb tot això dient que tant el temps com l'espai són relatius i afegeix el temps com a quarta dimensió, argumentant que no tots percebem el temps de la mateixa manera, per exemple, si viatgem a una velocitat cada cop més propera a la velocitat de la llum, el temps passarà més lentament per a nosaltres que per a una persona en repòs. Amb tot això, estem concloent que el temps és relatiu, depèn de l'observador. Pel que fa a l'espai, Einstein apuntava que nosaltres quan mesurem la velocitat de quelcom (un tren per exemple) ho fem de manera relativa a un altre objecte físic (com el terra o l'aire), per tant, deia ell, ni pel tren ni per res existeix un patró de moviment fix. El moviment és relatiu, una altra vegada, de l'observador. Així doncs, contràriament a com deia Newton, Einstein indicava que tant la longitud, com la llargada, com l'amplada són conceptes relatius. L'alemany, després d'enderrocar aquestes idees newtonianes, va construir les bases de la seva relativitat especial. I és que en l'univers relatiu d'Einstein hi havia quelcom absolut i universal, la velocitat de la llum. Aquesta no varia segons si qui l'observa s'està movent en sentit contrari o en el mateix. Això no passa, per exemple, si veiem un tren en moviment des d'un cotxe en moviment en el mateix sentit o parats a terra. Si ho veiem en repòs observarem com el tren es mou més ràpidament que si observéssim dins del cotxe en moviment. Això

confirmava l'experiment de Michelson-Morley<sup>3</sup>, on es volia provar que la velocitat de la llum és igual en totes les direccions i sentits, ja que aquesta és universal<sup>4</sup>, i sempre tindrà el mateix valor (299.792.458 m/s). Aquesta gran velocitat és la causant que no veiem la llum més lenta si viatgem en la mateixa direcció que ella, i és que, com hem vist anteriorment a la paradoxa dels germans bessons, si viatgéssim a més velocitat, el nostre temps passaria més lentament, això compensaria la nostra velocitat i faria que continuéssim veient la llum sempre a la mateixa velocitat.

Aquesta interacció entre espai i temps és la que desemboca en la idea de la mescla espai-temps d'Einstein, òbviament, relatiu a cadascú. La relativitat de l'espai-temps la veiem amb un exemple que proposa Thorne al seu llibre *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. En aquest, s'exposa una cosa impensable, que dos successos simultanis per a un observador, no ho siguin per a un altre, fet que obliga a pensar en la relativitat de la simultaneïtat.

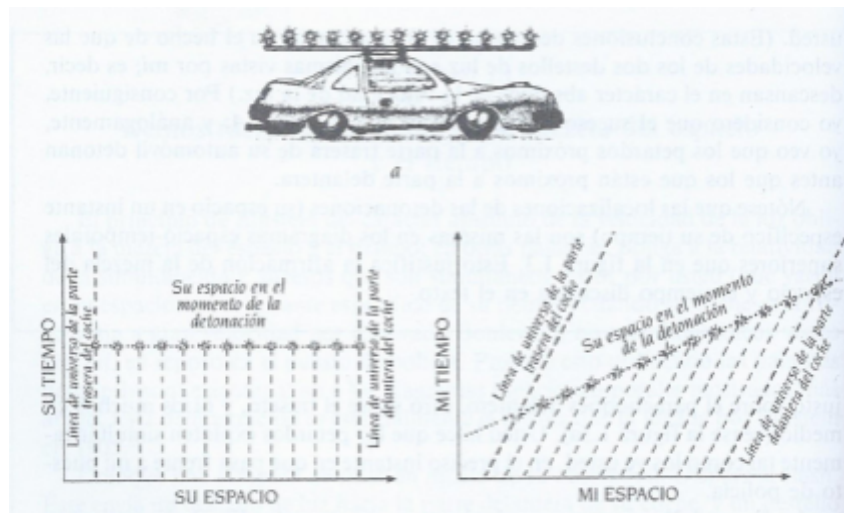
L'exemple és el següent: situem a dos observadors, un d'ells dins un cotxe en moviment i l'altre en repòs fora del vehicle. Sobre el cotxe, just al mig d'aquest, hi ha un flaix, que en disparar-lo, emetrà un flaix cap endavant i cap enrere del vehicle. La persona que va dins el cotxe veurà com la llum arriba simultàniament a la part davantera i posterior del cotxe, ja que en les dues direccions hi ha el mateix recorregut (el flaix està situat a la meitat del cotxe) i la velocitat és la mateixa (com ja hem vist la velocitat de la llum és universal). En canvi, l'altre observador, no veurà aquests successos com a simultanis. Des d'aquest nou punt de vista, la persona que està fora del vehicle veu com la part posterior del vehicle s'està movent cap endavant i la llum emesa pel flaix cap enrere. Si dues coses van en sentit contrari (part posterior i llum), es creuaran abans que dues que van en el mateix sentit (part davantera i llum). Però, com pot ser que no ens adonem d'això al nostre dia a dia?

---

<sup>3</sup> Michelson-Morley experiment [en línia]. Chicago: Britannica, 27 de juliol de 2020 [Consultat: 1 de desembre de 2022]. Disponible a: <<https://www.britannica.com/science/Michelson-Morley-experiment>>

<sup>4</sup> Aquesta universalitat és dins un mateix medi, el nombre de la velocitat esmentat a aquest apartat correspon al buit, a l'aire és molt semblant (299.705.543 m/s). A altres medis com l'aigua, on la velocitat és menor, la llum viatja a 224.844.349 m/s. Velocidad de la luz en un medio natural [en línia]. Wikipedia, 27 d'abril de 2007 [Consultat: 10 de desembre de 2022]. Disponible a: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad\\_de\\_la\\_luz\\_en\\_un\\_medio\\_material](https://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_de_la_luz_en_un_medio_material)>

Doncs, perquè els efectes de la relativitat general només es fan notoris a grans velocitats. Com més a prop de la velocitat de la llum, més ho percebríem. La següent imatge ho il·lustra:



**Imatge 4.** Il·lustració de l'exemple de la simultaneïtat on veiem el cotxe, el gràfic de qui va dins el cotxe i de qui està fora. Font extreta d' *Agujeros negros y tiempo curvo*.

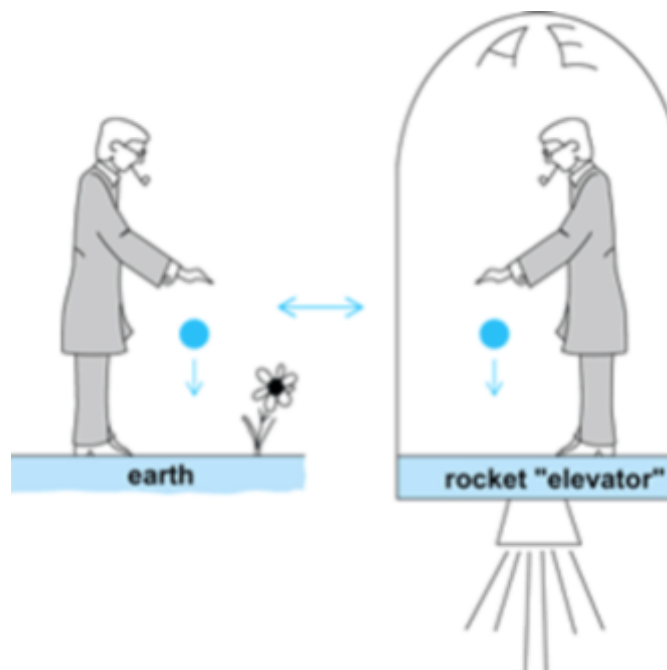
Per concloure amb la relativitat especial, cal dir que Einstein va idealitzar un univers sense gravetat per desenvolupar-la. Un acte bastant comú a l'hora de confeccionar teories, s'ometen aspectes els quals són difícils de tractar per abordar-los una vegada s'han tractat els més senzills. I això és el que va fer Einstein, un cop va donar per finalitzada la seva teoria de la relativitat especial va tornar a aquell aspecte que havia evitat fa anys: la gravetat. I, ara sí, tractant aquesta, va dur a terme la teoria de la relativitat general.

## **4.2. Vincle entre ambdues teories: el principi d'equivalència**

Einstein ja havia elaborat unes lleis que s'apliquen a qualsevol observador dins un sistema de moviment inercial (sense acceleració). Però per tal de posar la cirereta al pastís i elaborar unes lleis vàlides, aquest cop sí, per a qualsevol observador, havia d'afegir la gravetat a la seva relativitat especial. D'aquesta manera, Einstein va ampliar el rang de validesa de la seva teoria, incloent-hi moviments on actuen forces i, per tant, hi ha una acceleració.



Per tal de passar d'una teoria a una altra cal parlar del principi d'equivalència, el vincle entre ambdues teories. La idea amb la qual va començar aquesta nova teoria de la relativitat va ser pensant que passa quan caus d'una cadira. Quan ho fem, en la caiguda, no experimentem cap força, estem ingràvids i no sentim el nostre propi pes. Això mateix és el ganxo que Einstein necessitava per abandonar la relativitat especial i abordar la relativitat general (amb gravetat). El principi d'equivalència com a tal és la impossibilitat de diferenciar entre una acceleració ascendent i la gravetat descendent. Per exemple, no podríem diferenciar si ens trobem dins un ascensor en repòs a la terra o a un ascensor viatjant a gran velocitat per l'espai amb una acceleració constant i proporcional a la força que fa la gravetat.



**Imatge 5.** Il·lustració de la incapacitat de saber si estem en repòs a la Terra o en un ascensor a gran velocitat. Imatge extreta de [https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-the-Equivalence-Principle\\_fig4\\_269165706](https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-the-Equivalence-Principle_fig4_269165706)

Aquest és el nexa entre les lleis que Einstein ja havia desenvolupat (sense gravetat) amb les que volia desenvolupar (amb gravetat). El pare d'aquestes teories estudia la caiguda lliure, on, com ja hem dit, estem en un estat d'ingravitació (no notem el nostre propi pes), com un astronauta a l'espai. Per tant, tant en una caiguda lliure amb gravetat com a l'espai buit, les lleis de la física deuen ser les mateixes.

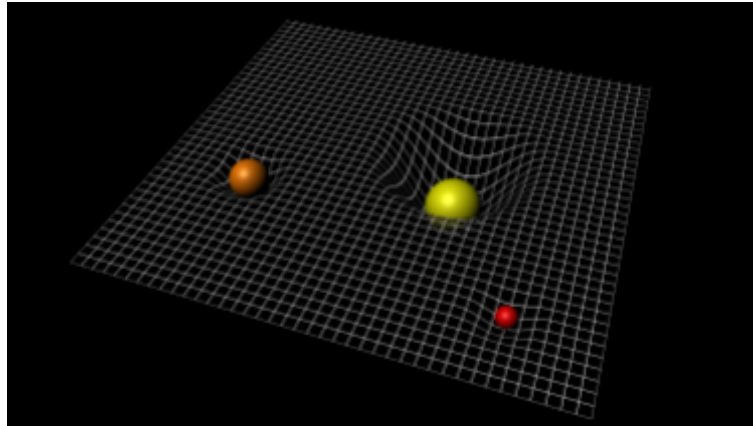
### **4.3. Aspectes generals de la relativitat especial**

Aquest vincle va permetre a Einstein afegir la gravetat a la seva teoria, la qual ja seria vàlida per a qualsevol situació dins el cosmos. Aquesta gravetat rep un nou sentit: tot i que continua essent una força, atès que descriu la interacció entre dues masses (nosaltres i la Terra per exemple), no segueix amb el sentit tradicional. Tindria més sentit catalogar-la com força “emergent”, en el sentit que allò que sembla una força directa entre dos cossos (dues masses) emergeix d’un altre efecte: la deformació o curvatura de l’espai-temps. Aquesta “nova gravetat” sembla ser més correcta que com la descrivia Newton: l’atracció entre dues masses. Es va demostrar mitjançant la llum, que està formada per fotons, unes partícules sense massa. Segons Newton, la llum no s’hauria de desviar en passar prop d’un cos massiu, puix que els fotons no tenen massa i, per tant, no serien atrets. Però això no és cert, la llum sí que es desvia. I Einstein ho justifica mitjançant la curvatura que provoquen els cossos massius amb un gran camp gravitatori a l’espai-temps, que obliguen a la trajectòria de la llum a desviar-se.<sup>5</sup>

El primer concepte clau, recentment esmentat, és la curvatura de l’espai-temps. Aquest ja ha estat tractat, però cal recordar que és un model del cosmos en el qual s’estableix una relació necessària entre espai i temps. El terme que incorporem ara és la curvatura. Per entendre tot millor hem d’imaginar-nos com seria aquest univers, i la manera més simple de fer-ho és amb una lona.

---

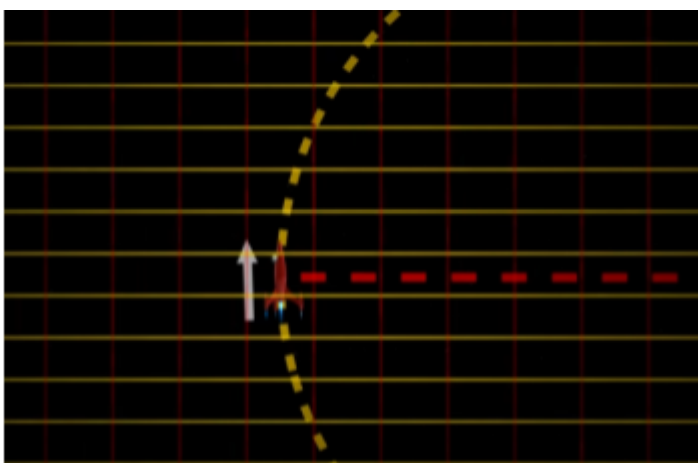
<sup>5</sup> Això es va demostrar experimentalment amb un eclipsi. Els astrònoms més destacats van estudiar i calcular quina seria la posició dels estels en el moment de l’eclipsi i en el moment d’aquest, van fer fotografies al cel. En analitzar-les, van veure que els estels no estaven al lloc que havien predit, això a causa de la desviació que pateix la llum, que no ens revela la posició vertadera dels estels.



**Imatge 6.** L'espai-temps i la seva curvatura. Font extreta de [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2015/09/Spacetime\\_curvature](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/09/Spacetime_curvature)

La curvatura es dona per l'acumulació d'energia. Els cossos amb més massa, òbviament, "corben" més l'espai. És precisament aquesta deformació dels cossos més grans el que funciona com a gravetat, "indicant" als cossos més petits com s'han de moure.

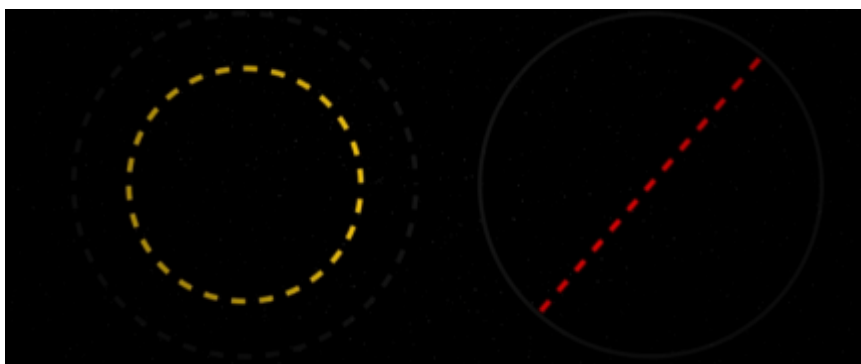
Una singularitat que ens permet veure que es deforma l'espai-temps és la contracció de Lorentz. Aquesta ens diu bàsicament que com més gran sigui la nostra velocitat, més es contraurà la longitud en la direcció del moviment. Vegem-ho amb el següent exemple: hem d'imaginar que estem donant voltes circulars al voltant d'un planeta, per exemple. A mesura que recorrem l'espai, la longitud (el perímetre del cercle) es fa més petita a causa del fenomen de la contracció de Lorentz. Aleshores, si el perímetre del cercle és més petit, també ho ha de ser el seu diàmetre? Doncs no, ja



**Imatge 7.** Contracció de Lorentz. Font extreta de <https://www.youtube.com/watch?v=ESveYNa4OMk>

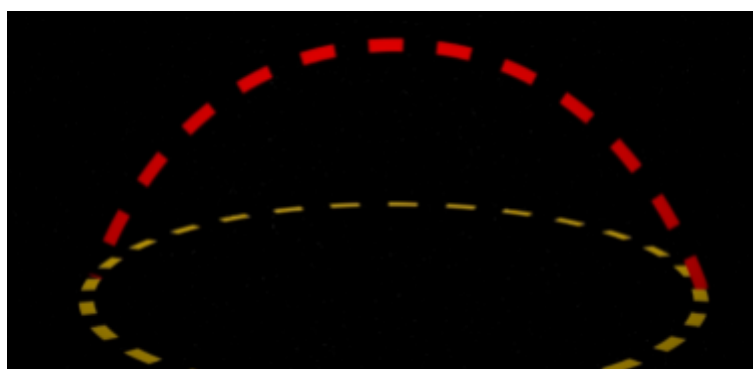
que la contracció Lorentz només actua en la direcció del moviment.

Si això passa, ens trobem en una situació molt peculiar, on el perímetre (groc) i el diàmetre (vermell) d'un cercle no es poden ajuntar, no es corresponen.



**Imatge 8.** Conseqüències de la contracció de Lorentz en el perímetre d'un cercle. Font extreta de <https://www.youtube.com/watch?v=ESveYNa4OMk>

Però, estem segurs que no hi ha cap manera de complementar-los? Doncs sí que hi ha una forma de fer-ho, i és la següent:



**Imatge 9.** Demostració de la curvatura de l'espai-temps. Font extreta de <https://www.youtube.com/watch?v=ESveYNa4OMk>

Aquest exemple ens permet evidenciar la curvatura de l'espai-temps i les peculiaritats d'aquest. A manera d'exemple, si agafem el perímetre anterior i el dividim entre el diàmetre no obtindrem el nombre  $\pi$ <sup>6</sup>, ja que respecte el cercle original, el perímetre ha disminuït però el diàmetre no. En un univers regit pel model espai-temps, introduït per Minkowski i treballat més a fons per Einstein, també trobem la peculiaritat que fa possible l'existència de triangles de més de 180 graus, gràcies a la curvatura.

---

<sup>6</sup> No obtenir el nombre  $\pi$  és un fet molt peculiar, ja que aquest s'obté en la divisió del perímetre de qualsevol circumferència entre el seu diàmetre.

Un altre aspecte contingut a la teoria de la relativitat general i que ens permetrà establir una manera de viatjar en el temps, concretament al futur, és la dilatació gravitatòria del temps<sup>7</sup>. Diu que si quelcom està en repòs respecte a un cos gravitant (la gravetat actua sobre ell), com més pròxims siguem d'aquest cos més lentament fluirà el temps. Per exemple, al terra de la nostra habitació, el temps passa més lentament que al sostre perquè el primer està més proper al cos gravitant respecte el qual està en repòs, la Terra. En aquest cas, la diferència és insignificant. Aleshores, per què hem dit que és un concepte tan important? Doncs perquè aquesta disminució del flux del temps augmenta segons la massa del cos respecte al qual ens trobem en repòs. A un sol centímetre d'un forat negre, la massa dels quals és 10 vegades la massa del Sol, el temps fluiria 6 milions de vegades més lent en comparació a un punt molt llunyà a aquest forat negre. Això ens obre moltes possibilitats per a efectuar viatges en el temps i les tractarem més endavant.

---

<sup>7</sup> El temps, diu la teoria de la relativitat d'Einstein, flueix a diferent ritme segons si estem a prop d'un cos amb menys o més massa.

## 5. RELATIVITAT GENERAL: FORATS NEGRES I FORATS DE CUC

### 5.1 Forats negres

Un estel qualsevol és estable gràcies a l'equilibri que proporcionen dues forces oposades: la pressió de radiació, la responsable que les estrelles brillin i la gravetat, que tendeix a comprimir l'estel. Quan la vida dels estels "s'acaba", la radiació deixa d'actuar i només ho fa la gravetat, per tant, l'estel es comença a comprimir i diem que col·lapsa. Si col·lapsa per sota d'un radi determinat, el radi de Schwarzschild, res podrà escapar de l'estirada gravitatòria de l'estel. Però, hi ha quelcom capaç d'acumular tanta massa en un espai molt petit? La resposta la trobem en els forats negres.

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

**imatge 10.** Fórmula del radi de Schwarzschild, distància de la qual cap cos podria escapar de l'atracció d'un forat negre. Font extreta

<https://www.emiliosilveravazquez.com/blog/2017/06/13/un-agujero-negro/>

D'on:

$r_s$  = radi de Schwarzschild       $G$  = constant gravitacional =  $6,67 \cdot 10^{-11}$

$M$  = massa del forat negre       $c$  = velocitat de la llum  $\approx 3 \cdot 10^8$

Un concepte molt important i que, a més, dona nom a aquests cossos còsmics, és la velocitat d'escapament. Aquesta és la velocitat necessària per escapar de la gravitació d'un planeta o un estel. Per exemple, si nosaltres llancem una pilota cap a dalt, aquesta tornarà a terra, a causa de la gravetat, però si la velocitat que imprimim sobre la pilota és prou gran, el tiró gravitatori de la Terra seria incapaç de retenir-la.

Aquesta velocitat es pot calcular molt fàcilment mitjançant el següent càlcul<sup>8</sup>, on la velocitat d'escapament s'aïlla en igualar l'energia cinètica de l'objecte amb l'energia de l'atracció gravitatòria.

$$\frac{GmM_T}{R} = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2GM_T}{R}}$$

**Imatge 11.** Fórmula d'on extreure la velocitat d'escapament d'un planeta. Font extreta de <http://cienciacomonunca.blogspot.com/2014/>

On:

$M_T =$  massa de la Terra =  $5,98 \cdot 10^{24}$       $v =$  velocitat d'escapament

$m =$  massa del cos que sortirà de l'òrbita del planeta      $R =$  radi de la Terra

Com es pot observar, la velocitat resultant variarà en funció de la massa i el radi del planeta i l'estel: com més massa i menys radi, més gran serà la velocitat necessària per escapar de la gravitació d'aquell cos.

Els forats negres són, precisament, concentracions enormes de massa amb un radi molt petit, per tant, la velocitat d'escapament d'aquests haurà de ser considerablement alta. I ho és, de fet, és tan alta que ni tan sols la llum (la velocitat més gran que es pot assolir amb 299.792.458 m/s) pot escapar del forat negre. És per això, pel fet de no deixar escapar la llum, que se'ls anomena forats negres.

<sup>8</sup> A l'edició espanyola de la web Hyperphysics (<https://bit.ly/3SOuweD>) hi ha un recurs que ens permet calcular la velocitat d'escapament de qualsevol cos segons la seva massa i el seu radi.

Acabem de dir que els forats negres són cossos amb una quantitat de massa molt elevada, i ho podem relacionar amb la dilatació gravitacional del temps. Aquesta ve donada per la següent fórmula:

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}}$$

**Imatge 12.** Fórmula de la dilatació gravitacional. Font extreta de:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Relativ/gratim.html>

On:

$T$  = temps de l'observador

$M$  = massa del cos (planeta, forat negre,...) que exerceix la dilatació

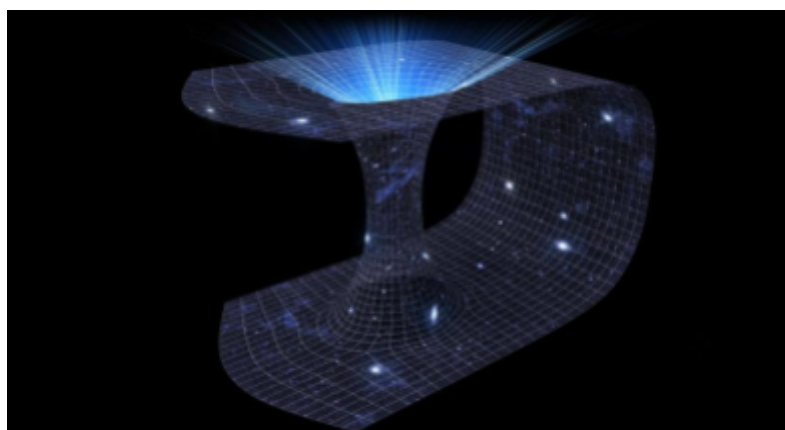
$R$  = distància al cos

Tot això ens obre les portes, almenys de forma teòrica, a una hipotètica forma de viatjar en el temps, ja que aquest passarà extremadament lent si ens situem a prop d'un forat negre.



## **5.2 Forats de cuc**

Mentre que dels forats negres ja ha estat demostrada la seva existència<sup>9</sup>, els forats de cuc són un concepte molt més teòric. Aquests són, d'una manera simplificada, dreceres espai-temporals. Per visualitzar-ho, hem de tornar a la lona de l'espai-temps: si apliquem una força prou gran per distorsionar la lona i doblegar-la, estariem disminuint la distància entre dos punts. Un forat de cuc els uniria de la següent manera:



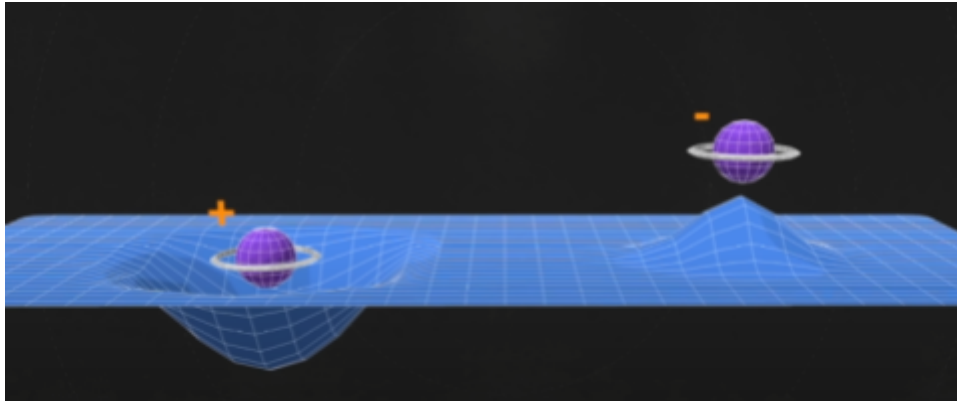
**Imatge 13.** Representació d'un forat de cuc. Font extreta de <https://bit.ly/3flvotC>

Com veiem, l'espai-temps quedaria connectat per dues boques (dos forats). Aquests no podrien ser dos forats negres, donat que aquests ho atrapen tot i no ho deixen sortir. Per tant, s'hauria de connectar un forat negre, que atrau tot, amb quelcom que expulsés tot, el que rep el nom de forat blanc. Aquestes connexions entre dos forats serien molt inestables i volàtils (naixerien i desapareixerien ràpidament), si no fos per l'acció de l'anomenada matèria exòtica, que mantindria obert aquest pont. És aquesta la que permetria crear un forat blanc. La solució ve de manera teòrica, donat que aquesta matèria té una massa i una energia negativa, que en lloc de generar un moviment d'atracció, en generarien un de repulsió, com dos imants.

---

<sup>9</sup> L'evidència més clarificadora va ser la fotografia d'un forat negre supermassiu, al centre de la galaxia M87

Black Hole Image Makes History; NASA Telescopes Coordinated Observations. NASA, 10 d'abril de 2019 [Consultat: 27 de novembre de 2022]. Disponible a: <<https://bit.ly/3Qxk5g0>>



**Imatge 14.** Efecte d'un forat negre (esquerre) i blanc (dreta) a l'espai-temps. Font extreta de <https://www.youtube.com/watch?v=bWI21CgyBXY>

Tenir una massa negativa sembla molt desconcertant, però ja s'han observat buits d'energia experimentalment a laboratoris<sup>10</sup>, on no només s'ha demostrat la seva existència, sinó també que es pot crear en quantitats molt petites. Aquesta matèria exòtica permetria mantenir un forat de cuc (entès com un forat negre i un blanc) obert.

Això deixa la porta oberta a l'existència de forats de cucs, tot i que sembla molt improbable que existeixin naturalment<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Aquest experiment va tenir lloc a l'Institut d'Electrònica Quàntica de l'Institut Federal Suís, on Cristina Benea-Chelms va observar fluctuacions de camp elèctric al buit. Informe complet i detallat: Benea-Chelms, Cristina. Electric field correlation measurements on the electromagnetic vacuum state [en línia]. Nature, 10 d'abril de 2019 [Consultat: 1 d'octubre de 2022]. Disponible a: <https://go.nature.com/3sGphDg>

<sup>11</sup> Mentre que dels forats negres sí que sabem com es poden arribar a formar, aquesta informació no la tenim dels forats de cuc, però es pensa que en el cas d'existir, podrien haver estat originats durant el Big Bang.

## 6. VIATJAR AL FUTUR

Aquest tipus de viatge és més “senzill” que el viatge al passat. Senzill en el sentit que cadascú de nosaltres viatgem al futur cada dia i realment no és gens difícil de fer, només hem de córrer, per exemple. A continuació explicarem això en detall. Però en aquests viatges que fem cada dia, viatgem molt poc al futur i si volem viatjar anys al futur, hem de recórrer a mètodes molt més complexos en els quals es requereix quelcom d'allò que hem tractat durant aquest treball.

Primer, hem de donar-li una volta al concepte de viatjar al futur, i veure què significa de debò. I no és més que fer que el temps passi més lentament, que el nostre rellotge faci tic-tac més a poc a poc. Imaginem que nosaltres ens fem dins un búnquer on el temps passa més lent. Si el nostre rellotge fa tic-tac més lentament que el del nostre amic, voldrà dir que ell fa anys més ràpidament i quan nosaltres tornem a la superfície, trobarem que som més joves que ell, per tant, hauréu viatjat al futur respecte el nostre amic.

Per fer que el temps passi més lentament hem de moure'ns més ràpidament: a més velocitat, més a poc a poc passa el temps. Això ho demostren les equacions de camp d'Einstein i l'experiment d'Hafele i Keating. A aquest experiment dos rellotges atòmics de cesi, amb una precisió gairebé absoluta, van començar a funcionar a la vegada. Un va romandre a la Terra i l'altre es va posar dins un avió comercial que va circular durant unes 40 hores. En tornar, es va contemplar com el rellotge de l'avió estava lleugerament endarrerit (centèsimes de mil·lèsima de milionèsima de segon) del que havia romàs a Terra, ja que havia estat sotmès a més velocitat.

A petita escala, si nosaltres correm, anem en cotxe o viatgem en avió estem viatjant al futur respecte una persona que roman en repòs. Això sí, la diferència de temps serà minúscula i no arribaríem ni a parlar de nanosegons. Si volem efectuar un veritable viatge al futur, necessitem anar a una velocitat molt elevada, com més pròxima sigui aquesta a la velocitat de la llum, més lent passarà el temps.

Els forats negres són un “estri” molt interessant si parlem de viatjar al futur i és, precisament per la dilatació gravitacional del temps. Recordem breument: quan ens apropem a un cos molt massic, el temps flueix més lentament. Llavors, si amb una nau ens situéssim a prop d’un forat negre, el temps transcorreria extremadament lent i en tornar del nostre viatge, hauríem viatjat al futur. Això sí, amb aquests cossos hem d’estar a la guaita, perquè apropar-nos massa, a una distància menor al radi de Schwarzschild, suposaria ser succionat pel forat negre.

Per tant, com a formes més clares de viatjar al futur dins d’allò contemplat a aquest treball tenim els forats negres i el fet d’anar a una velocitat considerablement elevada.

## 7. VIATJAR AL PASSAT

Aquests viatges ja són molt més complexes, en part, per les paradoxes que apareixen que fan que tan sols concebre un viatge al passat sigui una tasca complicada. A l'instant ens venen al cap infinites preguntes: què passa si mato el meu pare? O què passa si conec el meu jo passat? Aquestes creen, de manera inevitable, infinites paradoxes. El més proper a posar fi a aquestes paradoxes és la teoria que defensava Einstein, que diu que si viatgéssim al passat, crearíem una nova línia temporal i les accions dels nostres fets no tindrien repercussió a la nostra "vida anterior" sinó que formarien part de la nostra "nova vida" en aquesta nova línia de l'univers (vegeu [apartats 2 i 3.1](#)).

Al CERN<sup>12</sup> es va investigar que un neutrí pogués superar la velocitat de la llum, fet que com hem dit abans és impossible. De ser confirmat, suposaria un avenç important quant als viatges al passat, ja que segons diu Álvaro de Rújula, físic teòric del CERN, "En la Teoría de la Relatividad, la posibilidad de viajar a la velocidad de la luz es equivalente a la de viajar al pasado"<sup>13</sup>

Pel que fa als forats de cuc, travessar un d'aquests ens permetria viatjar tant en l'espai com en el temps, ja que hem dit que eren dreceres espaitemporals. Ara bé, cal desestimar-los com a opció per fer un viatge temporal, puix que, tal com ens diu el Dr. Blázquez-Salcedo a una entrevista amb la CNN<sup>14</sup>, aquest només serien travessables per objectes situats a l'escala de Planck<sup>15</sup>. Si no fos així, quelcom que travessés un forat de cuc podria pertorbar-lo de tal manera que aquest es desestabilitzés i es destruís.

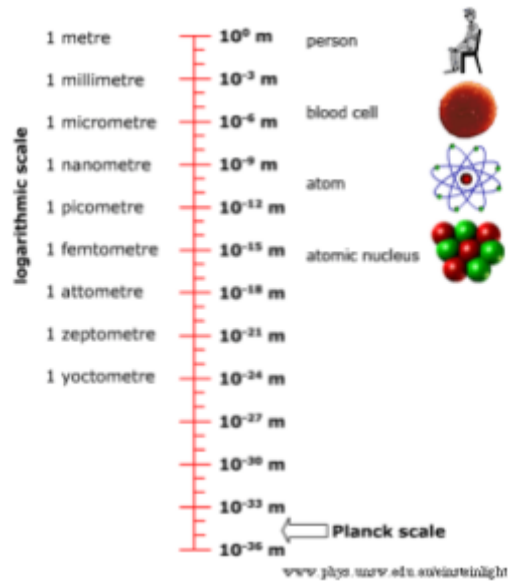
---

<sup>12</sup> El CERN ("Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire", o Centre Nacional per la Investigació Nuclear) és un dels laboratoris d'investigació més important.

<sup>13</sup> Corral, Miguel. 'Viajar a la velocidad de la luz es equivalente a poder viajar al pasado' [en línia]. El Mundo, 23 de setembre de 2011 [Consultat: 24 de novembre de 2022]. Disponible a: <https://www.elmundo.es/elmundo/2011/09/23/ciencia/1316782032.html>

<sup>14</sup> Arduino, Guillermo. ¿Es posible viajar en el tiempo a través de un agujero de gusano? [en línia]. CNN En Español, 30 d'abril de 2021 [Consultat: 15 de novembre de 2022]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=Y2KybCNRyHw>

<sup>15</sup> Quan parlem de l'escala de Planck ens referim a una longitud, massa, temps, càrrega i/o temperatura extremadament petita. En el cas de la longitud, a la qual ens referim a aquest apartat, la longitud de Planck ( $1.6 \times 10^{-35}$  metres) és la més petita, dins el que podem mesurar.



**Imatge 15.** Escala de Planck enfront altres mesures. Font extreta de <https://laleyendadedarwan.es/2020/02/04/fisica-a-la-escala-de-planck/>

No obstant això, fa relativament poc, els físics Juan Maldacena i Andrey Milekhin van fer un estudi teòric (Maldacena & Milekhin, 2020) sobre l'existència de forats de cuc travessables per persones. La conclusió que en van extreure és que sí que és possible, tot i que amb unes condicions, que encara que són possibles, són extremadament úniques, com una temperatura desmesuradament baixa: el zero absolut, corresponent a  $-273,15$  °C.

Així doncs, sembla que el viatge al passat no està reservat pels humans i sí per les partícules més petites del nostre univers. Un experiment d'uns científics russos a l'Institut de Física de Moscou va estudiar el comportament de l'electró (Lesovik et al. 2019). Els resultats assenyalen que si observéssim 10.000 milions d'electrons per segon des del Big Bang, en només un cas l'electró efectuaria espontàniament un viatge al passat.

Veient que per pura casualitat era tan improbable que un viatge al passat succeís, van intentar enviar un electró al passat. Aquest segon experiment està relacionat amb la segona llei de la termodinàmica, que diu que tot tendeix a un estat de desordre més gran. L'exemple més il·lustratiu és el del billar: al principi les boles estan perfectament organitzades en triangles, quan les colpegem es desordenen totes. Per tant, el que busquen els científics russos a aquest experiment és tornar a l'estat inicial, on "estava ordenat", i d'aquesta manera viatjar al passat. Ho van fer

mitjançant una computadora quàntica i bits quàntics (aquests, a diferència dels bits<sup>16</sup> tradicionals poden prendre el valor 0 i 1 a la vegada). El resultat de l'experiment va determinar que en un 85% dels casos es tornava a l'estat inicial. Aquest percentatge disminueix segons els bits quàntics emprats, i els científics ho atribueixen a imperfeccions en el disseny de la computadora quàntica. Aquestes imperfeccions fan, diuen els mateixos científics, que aquest experiment no pugui assegurar que el viatge al passat sigui possible, però sí que obre més la porta a aquesta possibilitat.

Com ja hem vist abans, sembla que fins que en el futur no es desenvolupin més les teories quàntiques (que aparenten tenir la clau per accedir als viatges al passat), els viatges al passat continuaran sent una mera suposició.

---

<sup>16</sup> Els bits s'utilitzen a informàtica, i són la unitat més mínima d'informació.

## 8. MARC PRÀCTIC: ANÀLISI DE PEL·LÍCULES

Per a l'elaboració d'aquest treball, hem fet una recerca bibliogràfica, tant per la part teòrica com la pràctica. Aquesta s'ha fonamentat en visitar la biblioteca i agafar informació de llibres situats a la secció de Física. A més, hem consultat els recursos web gràfics de la biblioteca, on s'ofereixen uns recursos com la cerca de pel·lícules. Aleshores, cercant com a tema 'viatges en el temps', vam escollir-ne *Retorn al Futur*. L'altra pel·lícula, *Interstellar*, ja l'havia vista i penso que és una molt bona tria. L'elecció es basa en el fet que amb la primera tractarem els viatges al passat i amb la segona els viatges al futur, fent esment als forats negres, forats de cuc i altres teories que deriven de la relativitat.

Regreso al futuro (1985)



Passa com amb Terminator, la dos encara, però la tres és manifestament millorable; i cap com la primera, evidentment. Bé, en tot cas, un altre clàssic modern. I un bon exemple de que vigileu quan aneu al passat, que segons què és millor no tocar-ho (esteu advertits).

**Imatge 16.** Resultat de la cerca 'viatges en el temps' a la selecció de cinema de la biblioteca virtual.  
Font extreta de

<https://bibliotecavirtual.diba.cat/cinema/recorreguts-cinematografics/viatges-en-el-temps>

El viatge en el temps és un recurs bastant recurrent a les pel·lícules de ciència-ficció. És interessant veure com es cataloguen dins aquesta categoria, i no dins la categoria de fantasia. Això vol dir que es tracten els viatges en el temps com quelcom factible. Ara bé, cada pel·lícula els tracta de manera ben diferent, algunes tenen una recerca científica darrere, en el sentit que la manera de justificar el viatge en el temps és coherent i d'altres simplement s'inventen un element fantàstic que per art de màgia fa viatjar en el temps al protagonista.



Durant aquest treball hem parlat de les maneres de viatjar en el temps, dels elements i les teories que ho fan possible. Per aplicar aquests coneixements provinents de la cerca bibliogràfica i a internet, analitzarem la manera en què es viatja en el temps a diferents pel·lícules, tant les que ho fan des d'un punt de vista més científic, com *Interstellar*, com les que no.

Cada pel·lícula analitzada seguirà la mateixa estructura: primer, l'argument d'ella centrant-nos en la part o les parts on es produeix el viatge en el temps; després, la descripció objectiva dels elements que segons la pel·lícula possibiliten viatjar en el temps i finalment, l'anàlisi de si aquestes raons donades són congruents i, per tant, la pel·lícula ens mostra una forma en la qual es podria efectuar un viatge en el temps.

## **8.1. Retorn al futur (Back to the future)**



Imatge 17. Cartell de *Retorn al Futur*. Font extreta de <https://www.filmaffinity.com/es/film309023.html>

### **8.1.1 Argument**

Aquesta serà la primera pel·lícula que analitzarem. Va ser emesa el 1985 i l'argument és el següent: en Marty McFly és trucat pel seu amic 'Doc'. Aquest diu que es reuneixi amb ell a un aparcament i que, a més, porti una càmera. En arribar, en Doc li demana que gravi el seu recent invent, una màquina del temps basada en un 'condensador de flux' i construïda en el famós DeLorean. El cotxe és capaç de viatjar tant al futur com al passat introduint la data al cotxe. En Doc ho prova fent que el seu gos Einstein viatgi al futur un minut. I ho aconsegueix. Seguidament, arriben uns terroristes als quals en Doc havia robat un material per construir la màquina. En Marty no té més remei que agafar el cotxe per fugir i sense voler activa el mecanisme que permet viatjar en el temps i acaba a l'any 1955, quan la idea de crear aquesta màquina del temps va arribar a la ment d'en Doc. En Marty veu com el cotxe es queda sense el combustible que l'alimenta (plutoni) i decideix anar a casa d'en Doc. Aquest li diu que el plutoni és molt difícil d'obtenir i l'única font d'energia que alimentaria la màquina seria un llamp. Marty sap que en una setmana caurà un raig a una torre i ho podrien utilitzar. Durant la seva estança al 1955, Marty interactua amb el seu pare i la seva mare, que encara no eren junts. La seva mare s'enamora d'ell i veu com a una fotografia que ell ja portava els seus germans desapareixen, fruit del no festeig dels seus pares. Finalment, en Marty aconsegueix que els seus pares es facin el seu primer petó com la història dictava i els seus

germans reapareixen a la foto. Un cop solucionat això, només li queda tornar al 1985. Torna amb en Doc perquè l'ajudi, i fica dins la seva gavardina un paper dient que en 30 anys uns terroristes el mataran. En Marty programa la màquina del temps (el DeLorean) per arribar deu minuts abans i impedir la mort d'en Doc. Però no ho aconsegueix, i un cop que el seu jo fuig perseguit pels terroristes s'apropa al cos del seu amic. Aquest és viu doncs porta una armilla blindada. En Marty se sorprèn, però en Doc treu de la butxaca la nota que fa trenta anys havia escrit en Marty. Després d'això, el protagonista torna a casa i observa com la seva casa i el seu entorn han canviat notablement a causa dels seus actes en el passat.

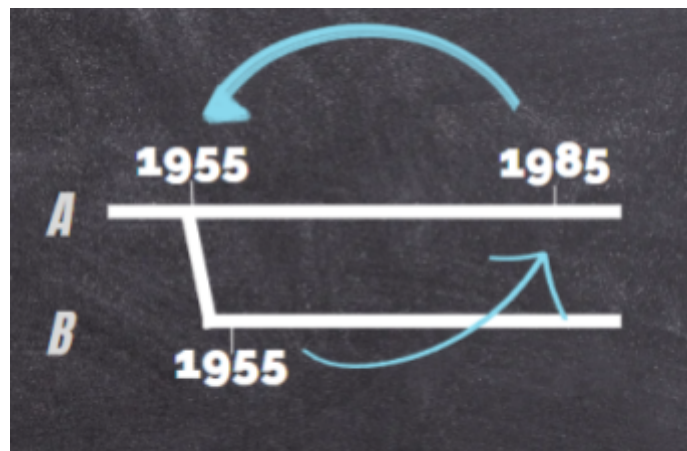
### **8.1.2 Viatge en el temps a la pel·lícula**

La màquina del temps, incorporada en el DeLorean es basa en un 'condensador de flux', del qual no s'explica bé la seva funció. En aquest cas, es produeix un viatge al passat, on les accions d'en Marty tenen repercussió en el 1985 del qual prové: fotografies on s'esborren els seus germans amb motiu que la seva mare s'enamora d'ell i no del seu pare i els canvis que veu quan torna al 1985 en són exemples de les alteracions que es produeixen arran dels seus actes.

### **8.1.3 Anàlisi**

Primer, comentarem ràpidament el 'condensador de flux', el "cor" de la màquina fabricada per en Doc. D'aquest no se'n dona cap explicació científica i sembla ser un element fantasiós per evitar una justificació de com efectuar un viatge en el temps, com el fet d'introduir la data al cotxe. Respecte al cotxe, a *Retorn al Futur*, el posen a una gran velocitat abans que s'efectuï el viatge al passat, i aquesta, com hem mencionat a l'[apartat 7](#), pot ser una manera de viatjar al passat. Però, evidentment la velocitat que adquireix el cotxe a la pel·lícula no seria necessària per viatjar al passat, ja que hauria de superar la velocitat de la llum. Per tant, podem concloure, igualment que amb el 'condensador de flux', que és un element per fer més espectacular la pel·lícula, però que realment no provocaria cap viatge al passat.

Però ens centrarem en el viatge al passat i el consegüent viatge al futur. El descrit a la pel·lícula és el següent:



**Imatge 18.** Representació dels viatges en el temps que tenen lloc en *Retorn al Futur*. Font pròpia.

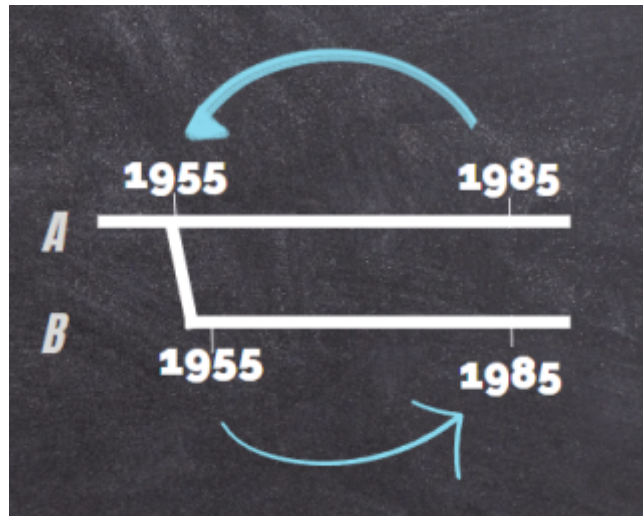
Segons el que es diu a la pel·lícula, els fets tenen una conseqüència en el futur del qual Marty prové. Com bé explica en Doc a la seqüela de la pel·lícula, en viatjar al passat estem creant una nova línia del temps, element totalment cert i coherent de la pel·lícula (a partir d'ara, ens referirem com "A" a la línia primitiva i "B" a la línia creada en viatjar al passat).



**Imatge 19.** Doc il·lustrant la nova línia del temps que s'hauria creat en viatjar al passat. Font extreta de <http://bit.ly/3AKWwJZ>

Però la incongruència ve ara. Segons va dir Einstein, en crear aquesta nova línia de l'univers, el futur que acabem d'abandonar resta com era, seguint el seu transcurs natural. Les accions de Marty dins "B", per tant, no afectaran el 1985 d' "A", sinó al seu nou 1985, el de la línia del temps "B". Tot i que entenem que es va fer per fer la trama més interessant, aquesta és una falla de la pel·lícula i a la fotografia que en Marty porta amb ell mai s'haurien d'esborrar els seus germans, ja que aquesta pertany a "A", on els seus germans, faci el que faci Marty a "B", continuaran existint. L'altra errada es troba en el viatge al futur des de 1955 a 1985 on Marty torna al 1985 d'on ve en un principi. A la pel·lícula se'n parla d'això com un viatge al futur, però realment seria un viatge al passat, encara que sembla confús el fet de viatjar entre realitats (línies de l'univers).

Si ens aferrem a definir aquest viatge el 1985 com un viatge al futur, el que hauria d'haver passat és el següent:



**Imatge 20.** Representació del que hauria d'haver passat amb els viatges en el temps en *Retorn al Futur*. Font pròpia

En Marty hauria d'haver aparegut el 1985 de "B" i no d' "A", el qual no devia haver estat modificat pels seus actes.

## **8.2 Interstellar**



**Imatge 21.** Cartell d'Interstellar. Font extreta de <https://www.filmaffinity.com/es/film704416.html>

### **8.2.1 Argument**

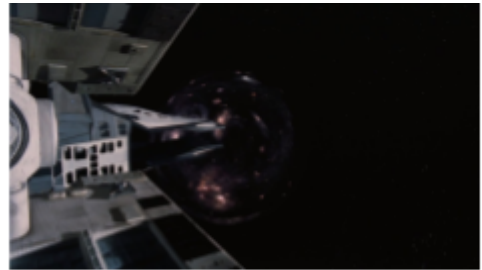
En un futur no molt llunyà, la Terra es trobarà en els seus últims anys de vida. Per aquest motiu, la NASA envia una expedició comandada per en Cooper a la recerca d'un planeta habitable. Tenen tres candidats, ja estudiats anteriorment: Miller, Mann i Edmunds. El primer dels planetes està bastant a prop d'un forat negre supermassiu, anomenat Gargantua. Han de marxar ràpidament del planeta per culpa d'una ona gegant i es dirigeixen cap a Mann. No tenen prou combustible per anar al tercer planeta i han de treure pes de la nau, Endurance, si ho volen fer. Cooper se sacrifica caient en el transbordador dins Gargantua, on aprofita el temps que li queda per reunir dades de l'interior del forat negre. Finalment, sobreviu gràcies a "ells", qui finalment entenem que són humans d'una civilització molt futura, que fins i tot han creat Gargantua. Tot per assegurar la continuïtat de l'espècie humana mitjançant Cooper i la seva filla Murph. El protagonista acaba retrobant-se amb la seva filla. Aquesta, però, és una anciana a punt de morir i ell està pràcticament igual que quan va marxar de la Terra. Per què?

### 8.2.2 Viatge en el temps a la pel·lícula

Els principals elements que provoquen el viatge en el temps i fan que en Cooper arribi més jove que la seva filla són el fet de moure's a una velocitat elevada durant tant de temps i la proximitat al forat negre supermassiu, Gargantua, sobretot al planeta Miller, on, segons la pel·lícula una hora al planeta és equivalent a un any a la Terra. A causa d'un imprevist, es queden més temps del compte i acaben transcorrent 23 anys terrestres durant la seva estança a Miller.

### 8.2.3 Anàlisi

El primer element en el qual ens centrarem molt ràpidament és el forat de cuc. Aquests, com ja vam dir, per poder ser travessables per persones han de complir unes condicions molt específiques (vegeu [apartat 7](#)). A la pel·lícula es podrien arribar a justificar per l'acció d'"ells".



Imatge 22. El forat de cuc d'Interstellar. Font extreta de <https://m.facebook.com/Amateur-En-F%C3%ADsica-107825767531434/videos/vida-inteligente/481113909585085/>

En travessar aquest forat de cuc, l'Endurance va haver d'assolir velocitats considerablement altes, i tal com ens diu la dilatació del temps, a majors velocitats el temps transcorre més lentament. Per tant, és una raó clarificadora de per què, en tornar amb la seva filla, en Cooper és més jove: el temps a passat més a poc a poc per ell que per la Murph.

Però el que realment va demorar el pas del temps per Cooper va ser Gargantua, un forat negre supermassiu d'una massa aproximada de 100 milions de vegades la massa del Sol<sup>17</sup>. Si recordem la dilatació gravitacional del temps, aquesta ens diu que, si ens situem a prop de cossos amb molta massa, el temps transcorre

---

<sup>17</sup> Agafem la massa de Gargantua com a 100 milions la massa del Sol perquè d'aquesta manera apareix a distintes webs sobre la pel·lícula i concorda amb la massa que s'estima que tenen els forats negres supermassius. Cal remarcar que és una dada no exacta, ja que a la pel·lícula no s'esmenta. Villatorio, Francisco. La física de la pel·lícula «Interstellar» [en línia]. La ciencia de la mula Francis, 12 de novembre de 2014 [Consultat: 28 d'octubre de 2022]. Disponible a: <<https://bit.ly/3VZSuFj>>  
Descubierta la pareja de agujeros negros supermasivos más cercanos a la Tierra [en línia]. National Geographic, 30 de novembre de 2021 [Consultat: 28 d'octubre de 2022]. Disponible a: <<https://bit.ly/3iuHHoS>>

extremadament lent i Gargantua és un cos molt massic. Aleshores, els temps deu passar molt lent com més a prop estiguem d'aquest. Això s'esmenta a la pel·lícula i Cooper idea una manera d'aterrar al planeta Miller (recordem que aquest està situat pròxim a Gargantua) més eficient: en lloc d'apropar-se gradualment a Miller, es situaran just a sobre del punt a aterrar fent una òrbita més àmplia, però fora de l'extrema dilatació gravitacional. Un cop a sobre, farien un descens en picat. D'aquesta manera estalviarien molt de temps. Això és una idea bastant enginyosa que ens mostra com de ben documentada científicament està *Interstellar*.



**Imatge 23.** Cooper explica com aterran al planeta Miller. Font extreta de <https://www.pelisplus2.io/pelicula/interstellar/>

Continuem amb el planeta de Miller. En estar orbitant i ser tan a prop d'un forat negre, perquè pogués existir i no ser engolit per Gargantua, el seu radi d'òrbita amb Gargantua ha de ser superior al radi de Schwarzschild del forat negre. Aquest és de fàcil càlcul tenint la massa i aplicant l'equació que apareix a l'[apartat 5.1](#).

$$r_{sch} = \frac{2 \cdot G \cdot M_{gargantua}}{c^2} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 100000000 \cdot 1,99 \cdot 10^{30}}{299792458^2} = 2,95 \cdot 10^{11} m$$

On:

$$c = \text{velocitat de la llum} = 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$$

$$M_{gargantua} = 100000000 \cdot M_{sol} = 100000000 \cdot 1,99 \cdot 10^{30} kg$$



D'això extraïem que el planeta Miller hauria d'estar a una distància mínima de  $2,95 \cdot 10^{11} m$  de Gargantua i, parlant qualitativament, a la pel·lícula sembla estar més a prop d'aquesta distància, tenint en compte que la distància de la Terra al Sol és més petita i Gargantua es veu molt més gran des de Miller que el Sol des de la Terra

L'últim element que analitzarem profundament és la dilatació gravitacional que té lloc al planeta Miller. A *Interstellar* diuen que una hora al planeta equival a 7 anys a la Terra. Això ens permet establir una relació entre els temps d'aquestes:

$$\frac{T_{terra}}{T_{Miller}} = \frac{7 \cdot 365 \cdot 24 h}{1 h} = 61320$$

Això ens indica que per cada hora a Miller transcorren 61230 hores a la Terra.

Per comprovar que vertaderament la relació és aquesta, utilitzarem la fórmula de la dilatació gravitacional, amb la qual calcularem quant de temps passa al planeta Miller per cada 7 anys terrestres emprant la fórmula de la dilatació gravitacional ([apartat 5.1](#))

$$T_{Miller} = T_{terra} \cdot \sqrt{1 - \frac{2 \cdot G \cdot M_{gargantua}}{R \cdot c^2}} = 61320 \cdot 3600 \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 100000000 \cdot 1,99 \cdot 10^{30}}{2,95 \cdot 10^{11} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}} = 2498111,639 s$$

On:

$$T_{terra} = \text{període de la Terra} = 220\,752\,000 s$$

$$G = \text{constant gravitacional} = 6,67 \cdot 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$$

$$M_{gargantua} = 100000000 \cdot M_{sol} = 100000000 \cdot 1,99 \cdot 10^{30} kg$$

$$R = \text{distància Miller - Gargantua} = 2,95 \cdot 10^{11} m$$

$$c = \text{velocitat de la llum} = 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$$

---

<sup>18</sup> Considerada aquesta la distància mínima per la qual és viable que el planeta Miller existeixi sense ser engolit pel forat negre. Això fa que el resultat correspongui al punt on la dilatació temporal és més gran i, per tant, menys temps a Miller equivalgui a més temps a la Terra.

Aquest càlcul ens indica el temps que passa a Miller mentre transcorren set anys a la Terra. Com podem veure, el resultat és de 2.498.111, 639 segons. Evidentment, el temps transcorre més lentament a Miller, pel fet d'estar situat al costat d'un forat negre supermassiu, però hem de comprovar si la dilatació temporal que es descriu a la pel·lícula és correcta.

Abans de continuar, hem de tenir present que en aquest càlcul hem fet servir la distància mínima entre Miller i Gargantua, fent que el resultat correspongui al punt on més dilatació temporal es patiria, és a dir, on més lent pasaria el temps a Miller. Aquesta distància correspon al radi de Schwarzschild anteriorment calculat, que és la distància mínima que hauria d'haver-hi entre Miller i Gargantua perquè l'existència del planeta fos viable.

Si recordem, anteriorment hem establert la relació donada a la pel·lícula entre el temps transcorregut a Miller envers la Terra. El resultat d'aquesta havia estat de 61.320, que vol dir que per cada hora a Miller transcorren 61.320 hores a la Terra.

A continuació, farem el mateix càlcul però amb el nou valor del temps a Miller corresponent als set anys terrestres:

$$\frac{T_{terra}}{T_{Miller}} = \frac{7 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}}{2\,498\,111,639 \text{ s}} = 88,4$$

Com podem observar la relació original (una hora al planeta Miller equivalent a 7 anys a la Terra) que s'esmenta a la pel·lícula seria incorrecte tenint en compte la dilatació gravitacional del temps. Fins i tot, dins el cas on la diferència de temps seria major, ja que hem agafat la distància mínima (on la dilatació que exerceix Gargantua és major), veiem com la relació dista molt. Amb aquest resultat, podem afirmar que cada hora de Miller correspon a 88,4 hores terrestres, molt diferent de les 61.320 hores que s'esmenten a la pel·lícula.

Entenem que a la pel·lícula es va donar aquella dada per fer-ho més espectacular i, realment, la fa més interessant i dona més vida al guió d'aquesta.

Amb aquesta anàlisi, podem concloure que, tot i comptar amb algunes dades incorrectes, però comprensibles perquè ajuden a la trama de la pel·lícula, a *Interstellar* es plasma quasi perfectament les causes que provoquen els viatges en el temps: anar a una alta velocitat, els forats negres i la dilatació del temps. *Interstellar* és l'exemple perfecte de com fer una pel·lícula amb un fil molt captivador respectant i subjectant-se en una base científica molt àmplia. El film va disposar de la participació d'un gran físic que ja hem esmentat en aquest treball: Kip Thorne. Aquest especialista en forats negres va ajudar a crear un guió correcte des del punt de vista de la ciència, fet que fa d'*Interstellar* una pel·lícula encara més rigorosa.

## 9. CONCLUSIONS

Un cop finalitzat el treball, hem d'extreure unes conclusions tant de la part teòrica com pràctica d'acord a les hipòtesis i objectius plantejats al començament.

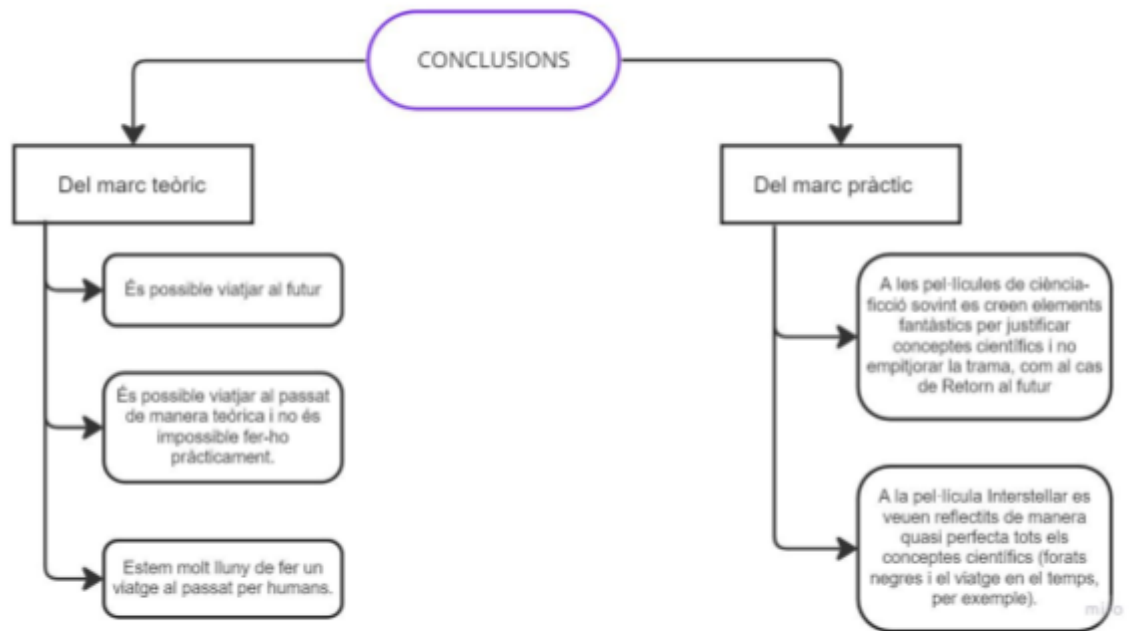
Davant la primera de les dues hipòtesis (és possible viatjar al futur, tant teòricament com pràcticament), podem afirmar, un cop fet tot el gruix de recerca bibliogràfica i web gràfica que és certa. Amb aquest treball, hem corroborat aquesta hipòtesi i, a més, hem vist com de senzill és viatjar al futur.

Quant a la segona hipòtesi (només és viable viatjar al passat de forma teòrica), hem de dir que aquesta no ha estat del tot certa. Perquè, tot i que sí que hem vist que és possible viatjar al passat de manera teòrica, se'ns ha presentat un vessant no esperada: és possible efectuar un viatge al passat de forma pràctica. Tot i que aquest viatge és força complicat i no està reservat per humans, és possible i, per tant, hem de concloure que la nostra segona hipòtesi inicial no és correcta.

Referent a la part pràctica, les conclusions extretes han satisfet perfectament un dels objectius, que era conèixer més a fons com es tracten els viatges en el temps a la cinematografia. Hem pogut concloure que moltes vegades, a les pel·lícules s'inventen elements fantàstics per tal de no haver de passar per una justificació científica que emboliqués la trama i la fes menys atractiva. Això ho veiem amb l'anàlisi de *Retorn al Futur* i el 'condensador de flux'. A partir d'analitzar *Interstellar*, obtenim la darrera conclusió: a aquesta pel·lícula s'aborden diversos conceptes científics com els forats negres i el consegüent viatge en el temps, de manera quasi perfecte.

Aquest treball ha estat profitós quant a les conclusions extretes, que han satisfet i acomplert la gran part de les meves hipòtesis, objectius i preguntes inicials que motivaven el treball de recerca.

A continuació, s'esquematitzen totes les conclusions:



Imatge 24. Esquema de les conclusions del treball. Font pròpia.

## 10. AGRAÏMENTS

Primerament, vull agrair a totes les persones que m'han ajudat durant el transcurs del treball, ja hagi estat en major o menor mesura.

Especialment, a les dues tutores que he tingut: l'Ana Justo i la Gisela Garcia. A la primera, per ajudar-me en les passes inicials d'aquest treball i a conduir-lo, i a la segona per guiar-me durant les últimes etapes del treball, on moltes coses es fan a correcció i tenir algú que et resolgui els diferents dubtes que van sorgint és molt important.

També vull agrair la família i els amics propers que tot i que no han col·laborat en el que és el mateix treball, sempre aporten aquell infravalorat suport que moltes vegades serveix d'empenta motivacional per a continuar amb el treball.

## 11. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA

- Andreu, Abraham. Prueban en la práctica la 'Radiación de Hawking, la teoría del físico teórico británico que demuestra que existe algo que puede escapar de los agujeros negros [en línea]. España: Business Insider, 14 d'octubre de 2021 [Consultat: 19 d'octubre de 2022]. Disponible a: <https://www.businessinsider.es/casi-demuestran-existe-algo-escapa-agujeros-negros-947801>>
- Arduino, Guillermo. ¿Es posible viajar en el tiempo a través de un agujero de gusano? [en línea]. CNN En Español, 30 d'abril de 2021 [Consultat: 15 de novembre de 2022]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=Y2KybCNRyHw>>
- Baird, Christopher. Why is gravity not a real force? [en línea]. Science Questions with Surprising Answers, 5 d'agost de 2022 [Consultat: 21 d'octubre de 2022]. Disponible a: <https://www.wtamu.edu/~cbaird/sq/2022/08/05/why-is-gravity-not-a-real-force/>>
- Crespo, José Luis. Viajar en el Tiempo según la Física Teórica [en línea]. Quantum Fracture (YouTube), 24 de gener de 2022 [Consultat: 25 d'abril de 2022]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=mo6c9F3wMS8&t=603s>>
- Crespo, José Luis. Por qué el Espacio se Curva [en línea]. Quantum Fracture (YouTube), 22 de febrer de 2018 [Consultat: 21 d'octubre de 2022]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=ESveYNa4OMk>>
- Eigenchris. Relativity 107a: General Relativity Basics - Equivalence Principle and Proper Acceleration [en línea]. YouTube, 10 d'abril de 2021 [Consultat: 14 de setembre de 2019]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=hU0Mcd2-XH4>>

- García, Laura. ¿Qué son los agujeros de gusano y por qué podrían permitir encontrar atajos a través del universo? [en línia]. BBC News Mundo (Youtube), 16 d'abril de 2022 [Consultat: 16 de setembre de 2022]. Disponible a: <<https://www.youtube.com/watch?v=bWl21CgyBXY>>
- Hawking, S. (2018). *Breus respostes per a les grans preguntes* (D. Jou Mirabent & D. Jou, Trans.). Columna CAT.
- Kaku, M. (2012). *Hiperespacio* (J. García Sanz, Trans.). Crítica.
- Lea, Robert. What is the grandfather paradox? [en línia]. Nova York: Space, 5 de juny de 2019 [Consultat: 18 de juliol de 2022]. Disponible a: <<https://www.space.com/grandfather-paradox.html>>
- Maldacena, Juan. Humanly traversable wormholes [en línia]. Cornell University, 15 d'agost de 2020 [Consultat: 16 de novembre de 2021]. Disponible a: <<https://arxiv.org/abs/2008.06618>>
- May, Andrew. 8 ways we know that black holes really do exist [en línia]. Live Science, 25 d'agost de 2021 [Consultat: 30 d'octubre de 2022]. Disponible a: <<https://www.livescience.com/how-we-know-black-holes-exist.html>>
- O'Connell, Cathal. Time travel: five ways that we could do it [en línia]. Adelaide: Cosmos, 3 d'agost de 2021 [Consultat: 7 de novembre de 2022]. Disponible a: <<https://cosmosmagazine.com/science/physics/five-ways-to-travel-through-time/>>



- Pereyra, Jordi. ¿POR QUÉ EL TIEMPO PASA MÁS DESPACIO CERCA DE UN AGUJERO NEGRO? CASO «INTERSTELLAR» [en línea]. Ciencia de Sofá, 18 de diciembre de 2014 [Consultat: 26 d'octubre de 2022]. Disponible a:  
<<https://cienciasofa.com/2014/12/por-que-el-tiempo-pasa-mas-despacio-cerca-de-un-agujero-negro-caso-interstellar.html>>
- Perkowitz, Sidney. twin paradox [en línea]. Britannica, 14 de juny de 2013 [Consultat: 18 de juliol de 2022]. Disponible a:  
<<https://www.britannica.com/science/twin-paradox>>
- Pössel, Markus. The elevator, the rocket, and gravity: the equivalence principle [en línea]. Einstein online, 10 de gener de 2005 [Consultat: 14 de setembre de 2022]. Disponible a:  
<[https://www.einstein-online.info/en/spotlight/equivalence\\_principle/](https://www.einstein-online.info/en/spotlight/equivalence_principle/)>
- Sacristán, Enrique. Guía sencilla para entender la foto del agujero negro [en línea]. SINC, 11 d'abril de 2019 [Consultat: 22 d'octubre de 2022]. Disponible a:  
<<https://www.agenciasinc.es/Noticias/Guia-sencilla-para-entender-la-foto-del-agujero-negro>>
- Santaolalla, Javier. HOY SÍ que vas a entender la Relatividad General [en línea]. Date Un Vlog (YouTube), 12 de maig de 2019 [Consultat: 27 de juny de 2022]. Disponible a:  
<<https://www.youtube.com/watch?v=RTIixJv7gWo&t=515s>>
- Serrano, Carlos. El modelo matemático que dice que es posible viajar en el tiempo (y soluciona un problema que enfrentan estas teorías) [en línea]. BBC, 16 de Novembre de 2020 [Consultat: 16 de Maig de 2022] Disponible a:  
<<https://www.bbc.com/mundo/noticias-54911540>>

- Serrano, Carlos. ¿Qué hay en el vacío?: el experimento cuántico que midió lo que hay en la "nada". BBC News Mundo, 1 de maig de 2019 [Consultat: 30 d'octubre de 2022]. Disponible a:  
<<https://www.bbc.com/mundo/noticias-48115068>>
- Stein, Vicky. Einstein's Theory of Special Relativity [en línia]. Space, 20 de setembre de 2019 [Consultat: 15 d'agost de 2022]. Disponible a:  
<<https://www.space.com/36273-theory-special-relativity.html>>
- Thorne, K. S. (2000). *Agujeros negros y tiempo curvo: El escandaloso legado de Einstein* (J. García Sanz, Trans.). Editorial Crítica.
- Wood, Charlie. White holes: What we know about black holes neglected twins [en línia]. Space, 24 de febrer de 2022 [Consultat: 19 d'octubre de 2022]. Disponible a: <<https://www.space.com/white-holes.html>>
- Agujeros negros [en línia]. National Geographic, 11 d'abril de 2019 [Consultat: 22 d'octubre de 2022]. Disponible a:  
<<https://www.nationalgeographic.es/espacio/agujeros-negros>>
- Correlaciones detectadas en un vacío cuántico [en línia]. Investigación y Ciencia, 26 d'abril de 2019 [Consultat: 30 d'octubre de 2022]. Disponible a:  
<<https://www.investigacionyciencia.es/noticias/correlaciones-detectadas-en-un-vaco-cuatico-17426>>
- Evidence for Black Holes [en línia]. LibreTexts Physics, 7 d'octubre de 2016 [Consultat: 29 d'octubre de 2022]. Disponible a:  
<[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy\\_Cosmology/Book%3A\\_Astronomy\\_\(OpenStax\)/24%3A\\_Black\\_Holes\\_and\\_Curved\\_Spacetime/24.06%3A\\_Evidence\\_for\\_Black\\_Holes](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_Cosmology/Book%3A_Astronomy_(OpenStax)/24%3A_Black_Holes_and_Curved_Spacetime/24.06%3A_Evidence_for_Black_Holes)>

- Resuelta la paradoja de los viajes al pasado [en línia]. Tendencias 21, 19 de diciembre de 2019 [Consultat: 19 de novembre de 2022]. Disponible a: <[https://tendencias21.levante-emv.com/resuelta-la-paradoja-de-los-viajes-al-pasado\\_a45615.html#comments](https://tendencias21.levante-emv.com/resuelta-la-paradoja-de-los-viajes-al-pasado_a45615.html#comments)>
- Spacetime curvature [en línia]. The european space agency, 1 de setembre de 2015 [Consultat: 21 d'octubre de 2022]. Disponible a: <[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2015/09/Spacetime\\_curvature](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/09/Spacetime_curvature)>

