

Geometria czarnych dziur

Jerzy Lewandowski
Uniwersytet Warszawski

Dlaczego jabłka spadają w dół?

Dlaczego jabłka spadają w dół?

Teoria 1

Dlaczego jabłka spadają w dół?

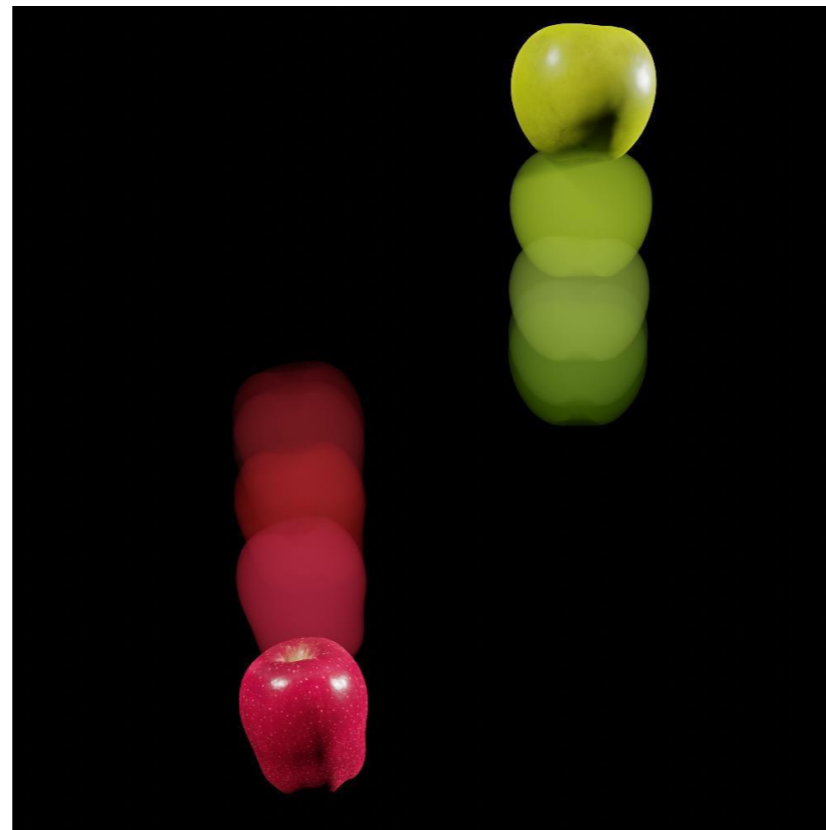
Teoria 1

Jabłka spadają zarówno w dół, jak i w górę

Dlaczego jabłka spadają w dół?

Teoria 1

Jabłka spadają zarówno w dół, jak i w górę

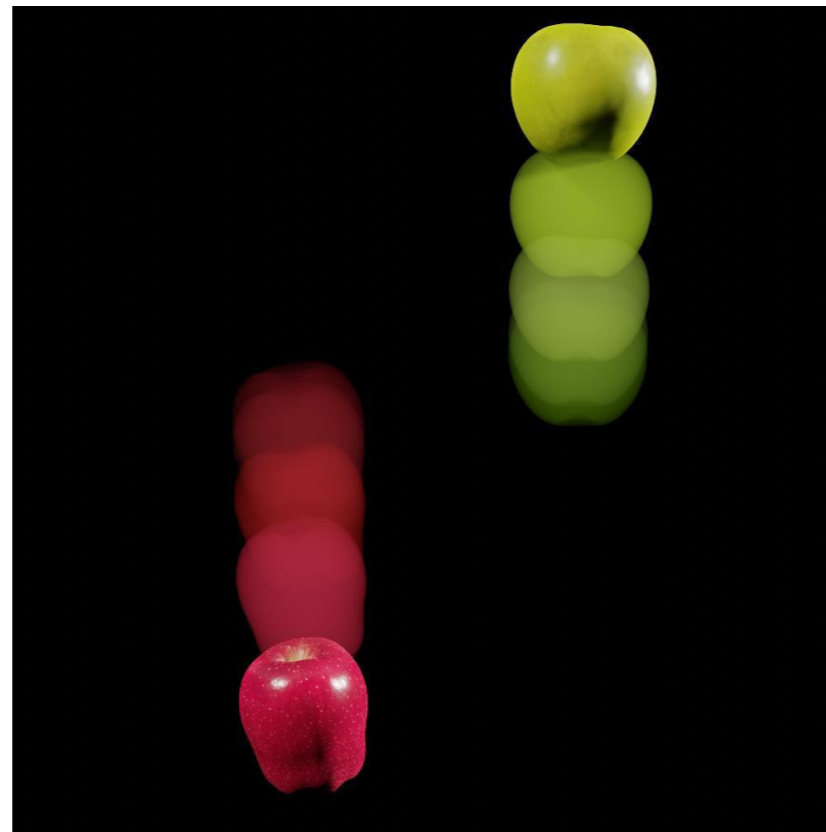


LDecat

Dlaczego jabłka spadają w dół?

Teoria 1

Jabłka spadają zarówno w dół, jak i w górę



LDecat

Jednak te spadające w górę odleciały i zostały tylko jabłka spadające w dół.
Żartobliwa “Darwinowska” teoria grawitacji.

Dlaczego jabłka spadają w dół?

Teoria 2

Dlaczego jabłka spadają w dół?

Teoria 2

Jabłka są przyciągane przez Ziemię.

Sir Isaac Newton 1687

Dlaczego jabłka spadają w dół?

Teoria 3

Dlaczego jabłka spadają w dół?

Teoria 3

Czas i przestrzeń tworzą czasoprzestrzeń wyposażoną w geometrię, którą Ziemia zakrzywia, a spadek swobodny to ruch po geodezyjnych.

Albert Einstein 1915

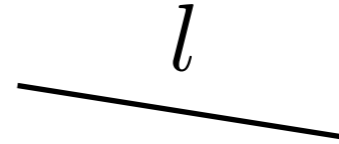
Czym jest czasoprzestrzeń według ogólnej teorii względności?

Geometria (grawitacja) przyporządkowuje każdemu kawałkowi krzywej liczbę: dodatnią, ujemną lub zero.

Czym jest czasoprzestrzeń według ogólnej teorii względności?

Geometria (gravitacja) przyporządkowuje każdemu kawałkowi krzywej liczbę: dodatnią, ujemną lub zero.

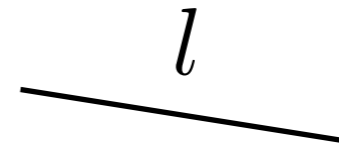
dodatnia to długość do kwadratu l^2



Czym jest czasoprzestrzeń według ogólnej teorii względności?

Geometria (gravitacja) przyporządkowuje każdemu kawałkowi krzywej liczbę: dodatnią, ujemną lub zero.

dodatnia to długość do kwadratu l^2



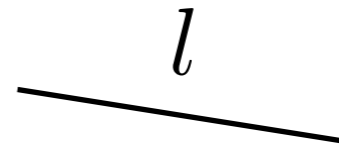
ujemna to minus czas do kwadratu $-t^2$



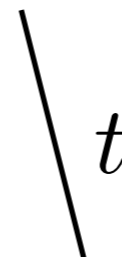
Czym jest czasoprzestrzeń według ogólnej teorii względności?

Geometria (gravitacja) przyporządkowuje każdemu kawałkowi krzywej liczbę: dodatnią, ujemną lub zero.

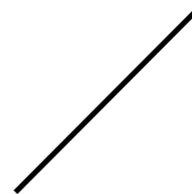
dodatnia to długość do kwadratu l^2



ujemna to minus czas do kwadratu $-t^2$



zero wyróżnia szczególną klasę krzywych są to trajektorie odpowiadające “ruchowi z prędkością światła”



Zjawisko czarnej dziury

na tym slajdzie zaniedbujemy ruch obrotowy omawianych ciał niebieskich

Zjawisko czarnej dziury

na tym slajdzie zaniebujemy ruch obrotowy omawianych ciał niebieskich

Gdy według obserwatora w nieskończoności upłyne czas t

to na powierzchni Ziemi upływa czas $\left(1 - \frac{8.8 \text{ mm}}{R}\right) t$

Zjawisko czarnej dziury

na tym slajdzie zaniebujemy ruch obrotowy omawianych ciał niebieskich

Gdy według obserwatora w nieskończoności upływie czas t

to na powierzchni Ziemi upływa czas $\left(1 - \frac{8.8 \text{ mm}}{R}\right) t$

promień Ziemi $R = 6371 \text{ km}$

poprawka jest niewielka $\frac{8.8 \text{ mm}}{6371 \text{ km}} = 1.4 \cdot 10^{-9}$

Zjawisko czarnej dziury

na tym slajdzie zaniebujemy ruch obrotowy omawianych ciał niebieskich

Gdy według obserwatora w nieskończoności upływie czas t

to na powierzchni Ziemi upływa czas $(1 - \frac{8.8 \text{ mm}}{R}) t$

promień Ziemi $R = 6371 \text{ km}$

poprawka jest niewielka $\frac{8.8 \text{ mm}}{6371 \text{ km}} = 1.4 \cdot 10^{-9}$

Jeśli jednak Ziemia zostałaby ściśnięta do promienia $R = 8.8 \text{ mm}$

to czas na jej powierzchni stanąłby w miejscu, w konsekwencji każdy punkt na jej powierzchni poruszałby się po krzywej zerowej, a więc odpowiadającej prędkości światła. Ziemia stałaby się **czarną dziurą**.

Zjawisko czarnej dziury

na tym slajdzie zaniebujemy ruch obrotowy omawianych ciał niebieskich

Gdy według obserwatora w nieskończoności upływie czas t

to na powierzchni Ziemi upływa czas $(1 - \frac{8.8 \text{ mm}}{R}) t$

promień Ziemi $R = 6371 \text{ km}$

poprawka jest niewielka $\frac{8.8 \text{ mm}}{6371 \text{ km}} = 1.4 \cdot 10^{-9}$

Jeśli jednak Ziemia zostałaby ściśnięta do promienia $R = 8.8 \text{ mm}$

to czas na jej powierzchni stanąłby w miejscu, w konsekwencji każdy punkt na jej powierzchni poruszałby się po krzywej zerowej, a więc odpowiadającej prędkości światła. Ziemia stałaby się **czarną dziurą**.

Dla Słońca $R = 2.96 \text{ km}$

Zjawisko czarnej dziury

na tym slajdzie zaniebujemy ruch obrotowy omawianych ciał niebieskich

Gdy według obserwatora w nieskończoności upływie czas t

to na powierzchni Ziemi upływa czas $(1 - \frac{8.8 \text{ mm}}{R}) t$

promień Ziemi $R = 6371 \text{ km}$

poprawka jest niewielka $\frac{8.8 \text{ mm}}{6371 \text{ km}} = 1.4 \cdot 10^{-9}$

Jeśli jednak Ziemia zostałaby ściśnięta do promienia $R = 8.8 \text{ mm}$

to czas na jej powierzchni stanąłby w miejscu, w konsekwencji każdy punkt na jej powierzchni poruszałby się po krzywej zerowej, a więc odpowiadającej prędkości światła. Ziemia stałaby się **czarną dziurą**.

Dla Słońca $R = 2.96 \text{ km}$ Dla Sagittariususa $R = 1.27 \cdot 10^7 \text{ km}$

Historia teorii czarnych dziur

Sir Isaac Newton 1687

grawitacja

Sir Isaac Newton 1687

grawitacja

John Michell 1783 Światło nie opuściłoby powierzchni bardzo masywnej gwiazdy, gdyby grawitacja była wystarczająco duża. „Gdyby taki obiekt naprawdę istniał w przyrodzie, jego światło nigdy by do nas nie dotarło” - **czarna dziura**

Sir Isaac Newton 1687

grawitacja

John Michell 1783 Światło nie opuściłoby powierzchni bardzo masywnej gwiazdy, gdyby grawitacja była wystarczająco duża. „Gdyby taki obiekt naprawdę istniał w przyrodzie, jego światło nigdy by do nas nie dotarło” - **czarna dziura**

Pierre-Simon de Laplace 1796

promień czarnej dziury

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

Sir Isaac Newton 1687 **grawitacja**

John Michell 1783 **Światło nie opuściłoby powierzchni bardzo masywnej gwiazdy, gdyby grawitacja była wystarczająco duża. „Gdyby taki obiekt naprawdę istniał w przyrodzie, jego światło nigdy by do nas nie dotarło” - czarna dziura**

Pierre-Simon de Laplace 1796 **promień czarnej dziury** $r = \frac{2GM}{c^2}$

Albert Einstein 1915 **geometryczna teoria pola grawitacyjnego**

Sir Isaac Newton 1687 grawitacja

John Michell 1783 Światło nie opuściłoby powierzchni bardzo masywnej gwiazdy, gdyby grawitacja była wystarczająco duża. „Gdyby taki obiekt naprawdę istniał w przyrodzie, jego światło nigdy by do nas nie dotarło” - czarna dziura

Pierre-Simon de Laplace 1796 promień czarnej dziury $r = \frac{2GM}{c^2}$

Albert Einstein 1915 geometryczna teoria pola grawitacyjnego

Karl Schwarzschild 1916 pole grawitacyjne sferycznie symetrycznego obiektu

Sir Isaac Newton 1687 grawitacja

John Michell 1783 Światło nie opuściłoby powierzchni bardzo masywnej gwiazdy, gdyby grawitacja była wystarczająco duża. „Gdyby taki obiekt naprawdę istniał w przyrodzie, jego światło nigdy by do nas nie dotarło” - czarna dziura

Pierre-Simon de Laplace 1796 promień czarnej dziury $r = \frac{2GM}{c^2}$

Albert Einstein 1915 geometryczna teoria pola grawitacyjnego

Karl Schwarzschild 1916 pole grawitacyjne sferycznie symetrycznego obiektu

Roy Kerr 1963 obracająca się czarna dziura

Sir Isaac Newton 1687 grawitacja

John Michell 1783 Światło nie opuściłoby powierzchni bardzo masywnej gwiazdy, gdyby grawitacja była wystarczająco duża. „Gdyby taki obiekt naprawdę istniał w przyrodzie, jego światło nigdy by do nas nie dotarło” - czarna dziura

Pierre-Simon de Laplace 1796 promień czarnej dziury $r = \frac{2GM}{c^2}$

Albert Einstein 1915 geometryczna teoria pola grawitacyjnego

Karl Schwarzschild 1916 pole grawitacyjne sferycznie symetrycznego obiektu

Roy Kerr 1963 obracająca się czarna dziura

John Archibald Wheeler 1967 nazwa "CZARNA DZIURA"

Sir Isaac Newton 1687 grawitacja

John Michell 1783 Światło nie opuściłoby powierzchni bardzo masywnej gwiazdy, gdyby grawitacja była wystarczająco duża. „Gdyby taki obiekt naprawdę istniał w przyrodzie, jego światło nigdy by do nas nie dotarło” - czarna dziura

Pierre-Simon de Laplace 1796 promień czarnej dziury $r = \frac{2GM}{c^2}$

Albert Einstein 1915 geometryczna teoria pola grawitacyjnego

Karl Schwarzschild 1916 pole grawitacyjne sferycznie symetrycznego obiektu

Roy Kerr 1963 obracająca się czarna dziura

John Archibald Wheeler 1967 nazwa "CZARNA DZIURA"

Sir Roger Penrose 1965, Steven Hawking 1970 twierdzenia o osobliwościach

**Czy czarne dziury mogą istnieć,
na ile ich istnienie jest prawdopodobne?**

Sceptycyzm: Albert Einstein

Sceptycyzm: Albert Einstein

ANNALS OF MATHEMATICS
Vol. 40, No. 4, October, 1939

ON A STATIONARY SYSTEM WITH SPHERICAL SYMMETRY CONSISTING OF MANY GRAVITATING MASSES

BY ALBERT EINSTEIN
(Received May 10, 1939)

Sceptycyzm: Albert Einstein

ANNALS OF MATHEMATICS
Vol. 40, No. 4, October, 1939

ON A STATIONARY SYSTEM WITH SPHERICAL SYMMETRY CONSISTING OF MANY GRAVITATING MASSES

BY ALBERT EINSTEIN

(Received May 10, 1939)

The essential result of this investigation is a clear understanding as to why the “Schwarzschild singularities” do not exist in physical reality. Although the theory given here treats only clusters whose particles move along circular paths it does not seem to be subject to reasonable doubt that more general cases will have analogous results. The “Schwarzschild singularity” does not appear for the reason that matter cannot be concentrated arbitrarily. And this is due to the fact that otherwise the constituting particles would reach the velocity of light.

Sceptycyzm: Albert Einstein

ANNALS OF MATHEMATICS
Vol. 40, No. 4, October, 1939

ON A STATIONARY SYSTEM WITH SPHERICAL SYMMETRY CONSISTING OF MANY GRAVITATING MASSES

BY ALBERT EINSTEIN

(Received May 10, 1939)

czarne dziury

The essential result of this investigation is a clear understanding as to why the “Schwarzschild singularities” do not exist in physical reality. Although the theory given here treats only clusters whose particles move along circular paths it does not seem to be subject to reasonable doubt that more general cases will have analogous results. The “Schwarzschild singularity” does not appear for the reason that matter cannot be concentrated arbitrarily. And this is due to the fact that otherwise the constituting particles would reach the velocity of light.

Sceptycyzm: Albert Einstein

ANNALS OF MATHEMATICS
Vol. 40, No. 4, October, 1939

ON A STATIONARY SYSTEM WITH SPHERICAL SYMMETRY CONSISTING OF MANY GRAVITATING MASSES

BY ALBERT EINSTEIN

(Received May 10, 1939)

czarne dziury

nie istnieją w fizycznej rzeczywistości

The essential result of this investigation is a clear understanding as to why the “Schwarzschild singularities” do not exist in physical reality. Although the theory given here treats only clusters whose particles move along circular paths it does not seem to be subject to reasonable doubt that more general cases will have analogous results. The “Schwarzschild singularity” does not appear for the reason that matter cannot be concentrated arbitrarily. And this is due to the fact that otherwise the constituting particles would reach the velocity of light.

Sceptycyzm: Steven Weinberg

Sceptycyzm: Steven Weinberg

GRAVITATION
AND COSMOLOGY:
PRINCIPLES AND APPLICATIONS
OF THE GENERAL THEORY
OF RELATIVITY

STEVEN WEINBERG
Massachusetts Institute of Technology

Sceptycyzm: Steven Weinberg

GRAVITATION AND COSMOLOGY: PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF THE GENERAL THEORY OF RELATIVITY

STEVEN WEINBERG
Massachusetts Institute of Technology

8 The Schwarzschild Singularity*

The reader will probably have noticed that the Schwarzschild solution (8.2.12) becomes singular at $r = 2MG$. This radius corresponds to $\rho = MG/2$ and $R = MG$, so we see that this singularity also occurs when the metric is expressed in its isotropic form (8.2.14) or in its harmonic form (8.2.15). The radius $2GM$ at which the singularity occurs in standard coordinates is called the *Schwarzschild radius* of the mass M .

It should immediately be stressed that there is no Schwarzschild singularity in the gravitational field of any known object in the universe.

Sceptycyzm: Steven Weinberg

GRAVITATION AND COSMOLOGY: PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF THE GENERAL THEORY OF RELATIVITY

STEVEN WEINBERG
Massachusetts Institute of Technology

8 The Schwarzschild Singularity*

The reader will probably have noticed that the Schwarzschild solution (8.2.12) becomes singular at $r = 2MG$. This radius corresponds to $\rho = MG/2$ and $R = MG$, so we see that this singularity also occurs when the metric is expressed in its isotropic form (8.2.14) or in its harmonic form (8.2.15). The radius $2GM$ at which the singularity occurs in standard coordinates is called the *Schwarzschild radius* of the mass M .

It should immediately be stressed that there is no Schwarzschild singularity in the gravitational field of any known object in the universe.

Sceptycyzm: Steven Weinberg

GRAVITATION AND COSMOLOGY: PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF THE GENERAL THEORY OF RELATIVITY

STEVEN WEINBERG
Massachusetts Institute of Technology

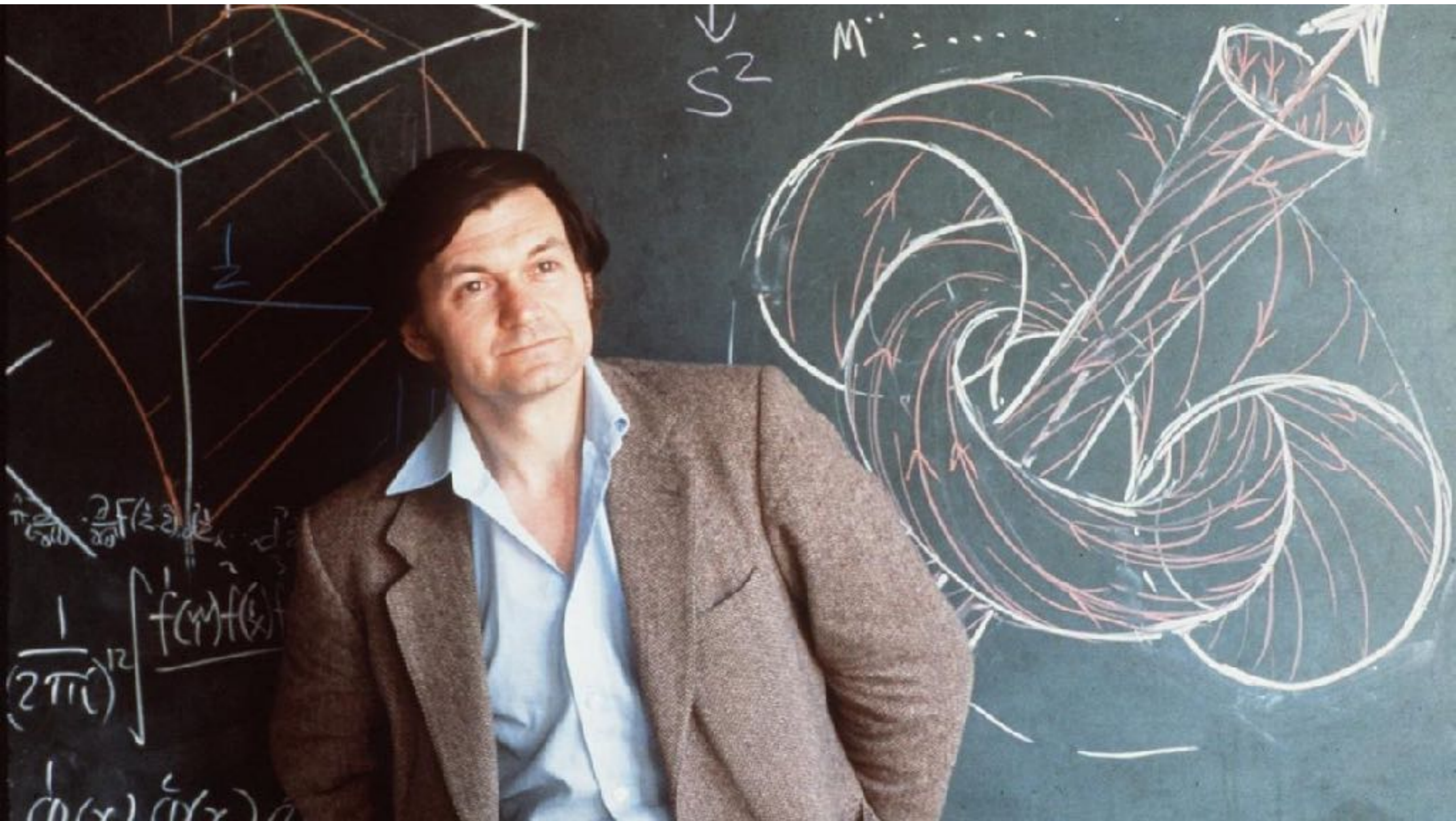
8 The Schwarzschild Singularity*

The reader will probably have noticed that the Schwarzschild solution (8.2.12) becomes singular at $r = 2MG$. This radius corresponds to $\rho = MG/2$ and $R = MG$, so we see that this singularity also occurs when the metric is expressed in its isotropic form (8.2.14) or in its harmonic form (8.2.15). The radius $2GM$ at which the singularity occurs in standard coordinates is called the *Schwarzschild radius* of the mass M .

It should immediately be stressed that there is no Schwarzschild singularity in the gravitational field of any known object in the universe.

W tym miejscu należy natychmiast podkreślić, że osobliwość Schwarzschilda nie występuje w polu grawitacyjnym żadnego znanego obiektu we wszechświecie

**Czy czarne dziury istnieją
we wszechświecie?**



Roger Penrose

<https://www.bbc.com/news/science-environment-54439150>

GRAVITATIONAL COLLAPSE AND SPACE-TIME SINGULARITIES

Roger Penrose

Department of Mathematics, Birkbeck College, London, England

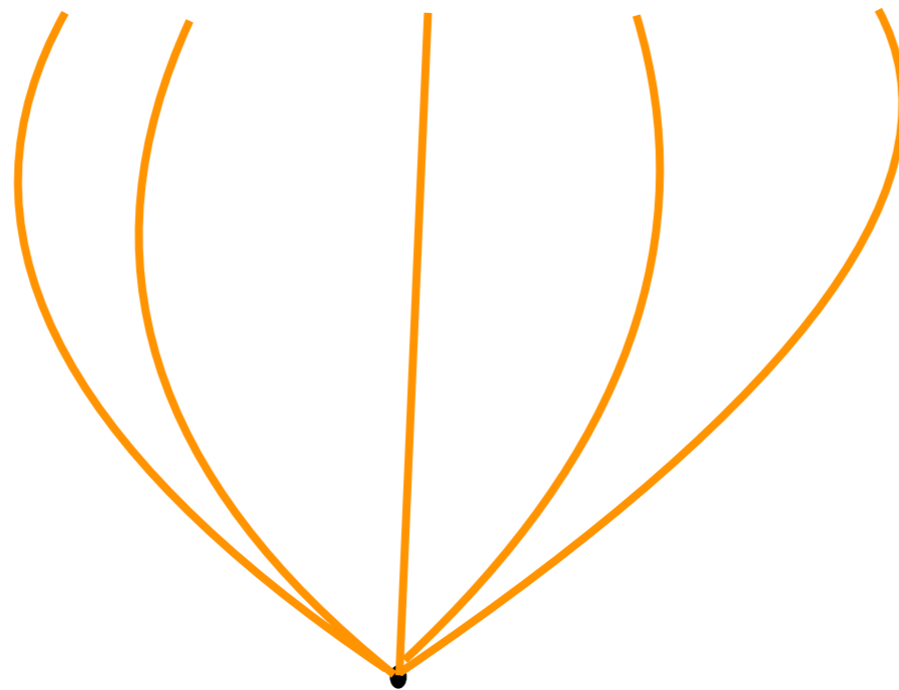
(Received 18 December 1964)

The discovery of the quasistellar radio sources has stimulated renewed interest in the question of gravitational collapse. It has been suggested

measured by local comoving observers, the body passes within its Schwarzschild radius $r = 2m$. (The densities at which this happens

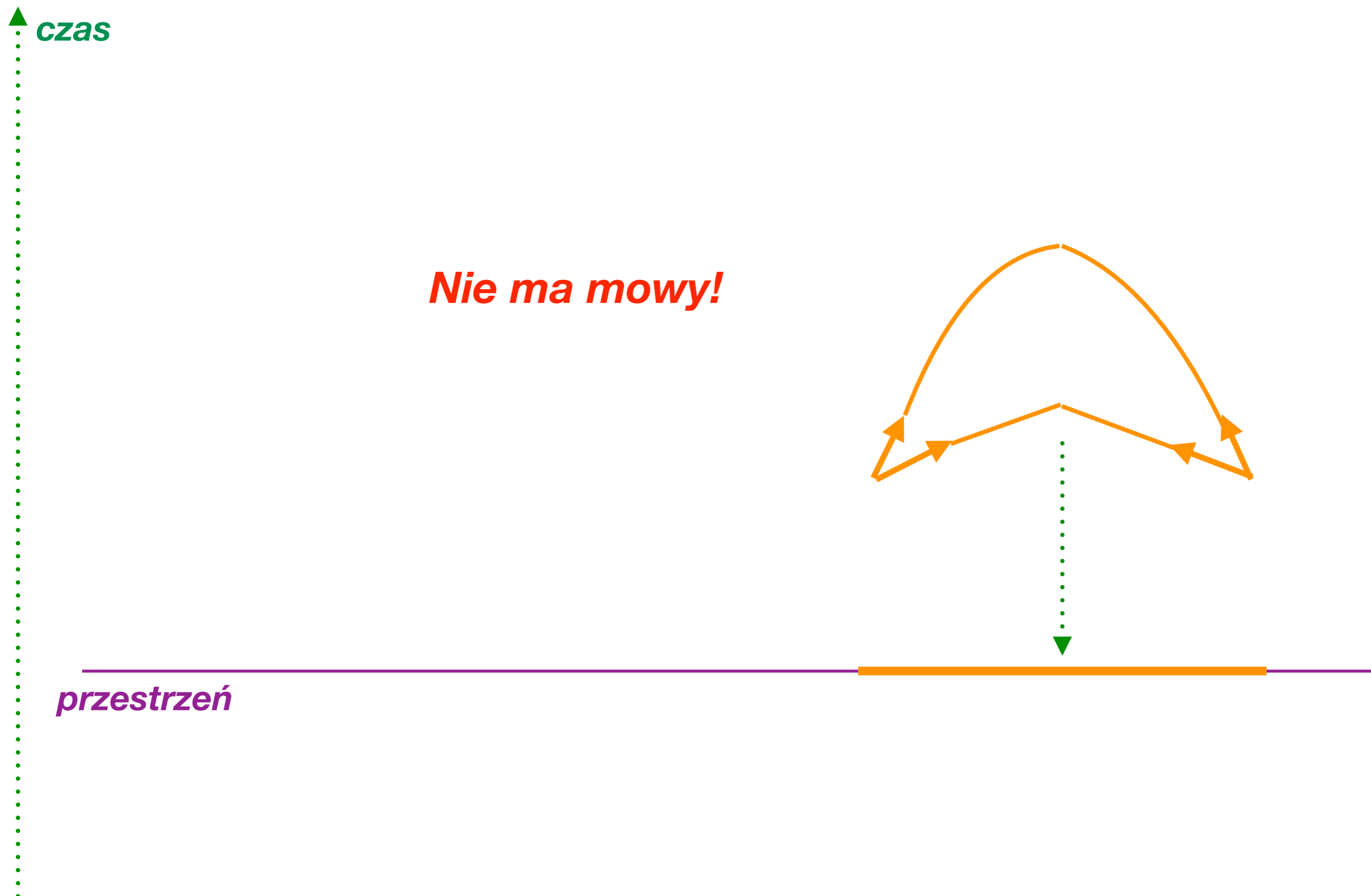
Teoretyczne wyprowadzenie istnienia czarnych dziur z teorii Einsteina.

Penrose udowodnił, że formowanie się czarnej dziury w wyniku kolapsu grawitacyjnego jest prawdopodobne i nawet nieuniknione, jeśli kolaps przekroczy pewien graniczny punkt, którym jest kontrakcja (zamiast ekspansji) rozchodzących się promieni światła.



Udowodnił, że przyszłość takiego punktu można zawrzeć w skończonej powierzchni 3j wymiarowej.

Czy przyszłość może mieć zwarty brzeg?



**Wniosek Penrose'a:
czarna dziura jest prawdopodobnym stanem
końcowym grawitacyjnej zapaści gwiazdy.**

Potwierdzenia obserwacyjne

Obserwacje bezpośrednie

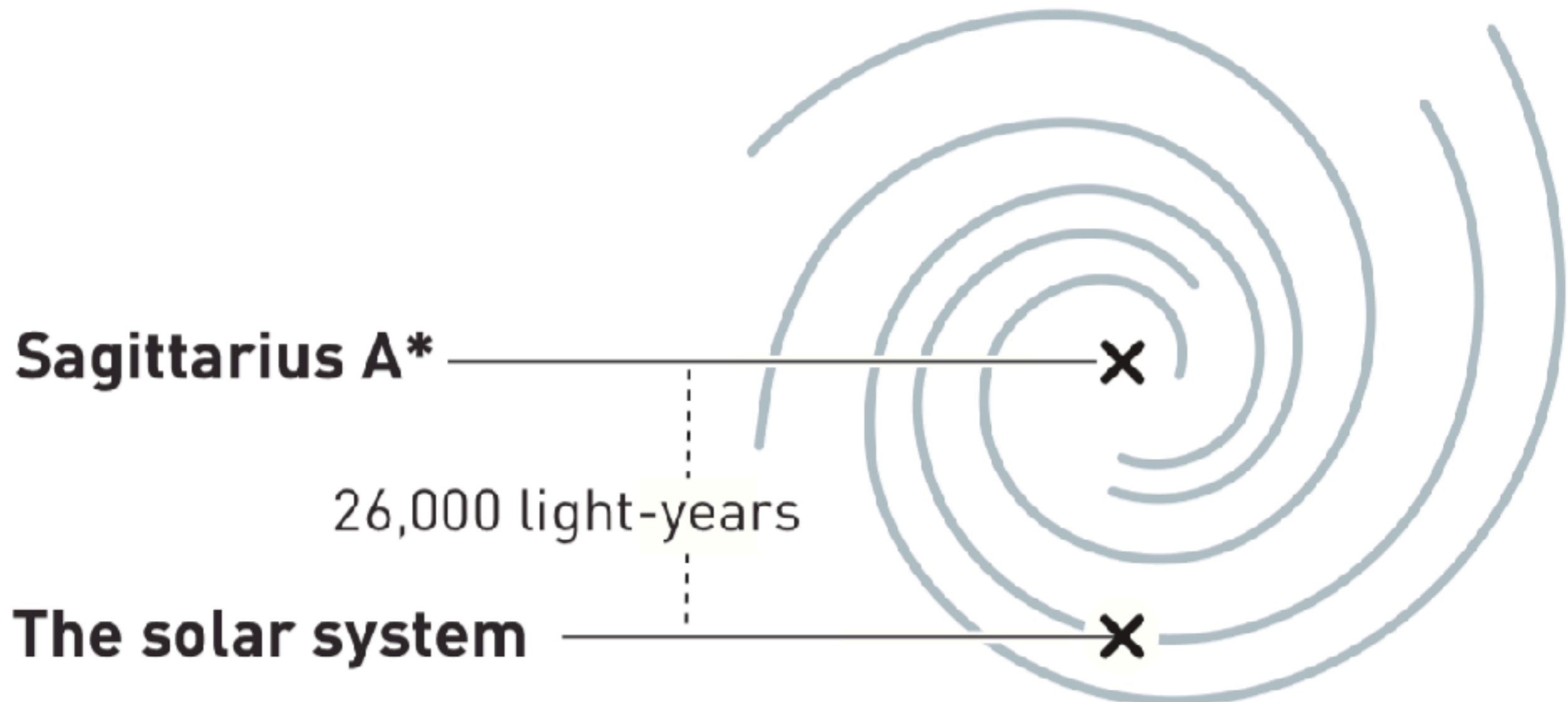
**Reinhard Genzel and Andrea Ghez:
the first observation of a black hole,
Sagittarius A*, 1990**

Obserwacje bezpośrednie

**Reinhard Genzel and Andrea Ghez:
the first observation of a black hole,
Sagittarius A*, 1990**

<https://www.nobelprize.org>

The Milky Way



Obserwacje pośrednie

Obserwacje pośrednie

Rainer Weiss, Barry C. Barish and Kip S. Thorne:
zderzenie dwóch czarnych dziur (2015)

Obserwacje pośrednie

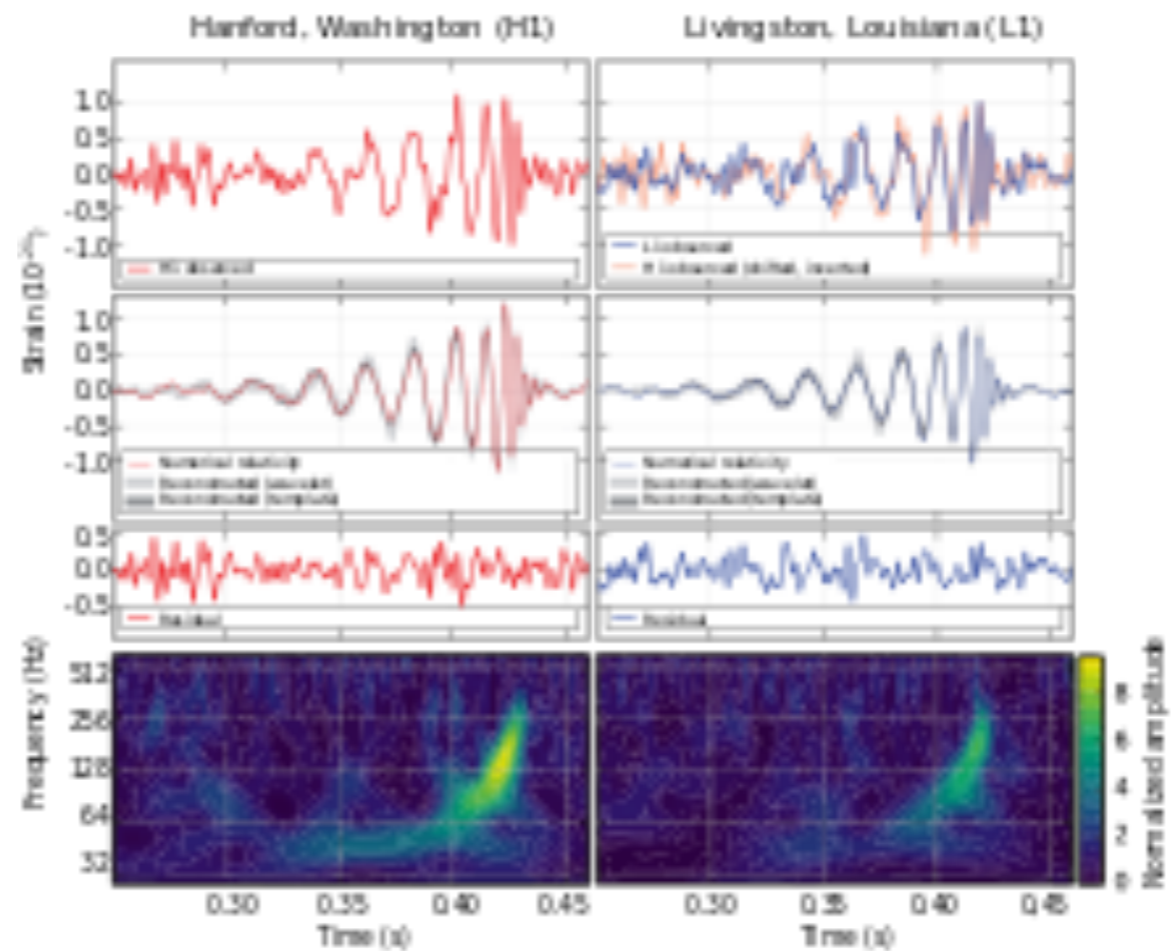
Rainer Weiss, Barry C. Barish and Kip S. Thorne:
zderzenie dwóch czarnych dziur (2015)

Rejestracja powstałej fali grawitacyjnej **GW15094 2015**

Obserwacje pośrednie

Rainer Weiss, Barry C. Barish and Kip S. Thorne:
zderzenie dwóch czarnych dziur (2015)

Rejestracja powstałej fali grawitacyjnej **GW150914** 2015



https://dcc.ligo.org/public/0127/G1601533/004/ICHEP_2016_GW.pdf

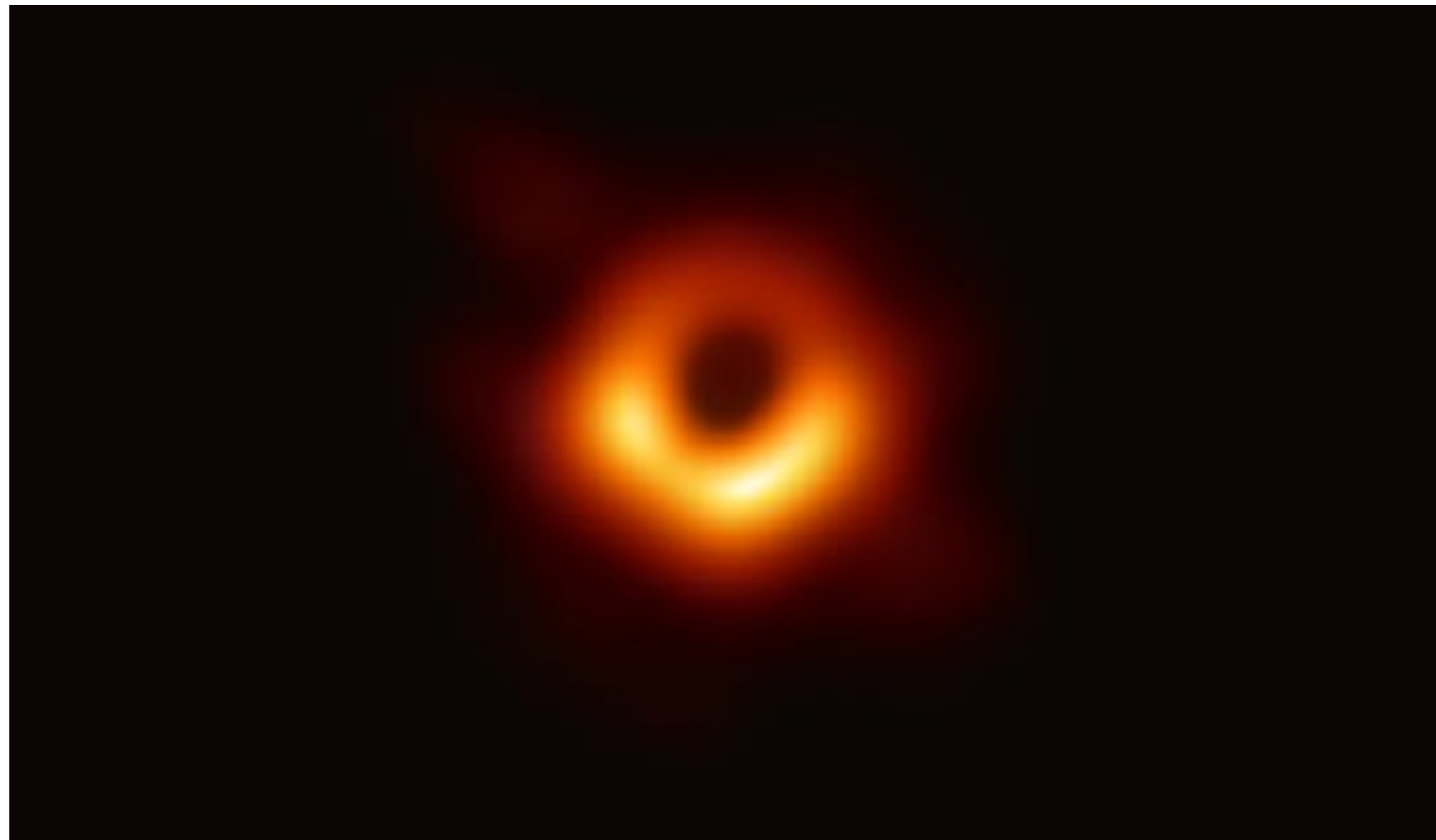
Bezpośrednia obserwacja

Bezpośrednia obserwacja

**Program teleskop horyzontów zdarzeń
Event Horizon Telescope 2019**

Bezpośrednia obserwacja

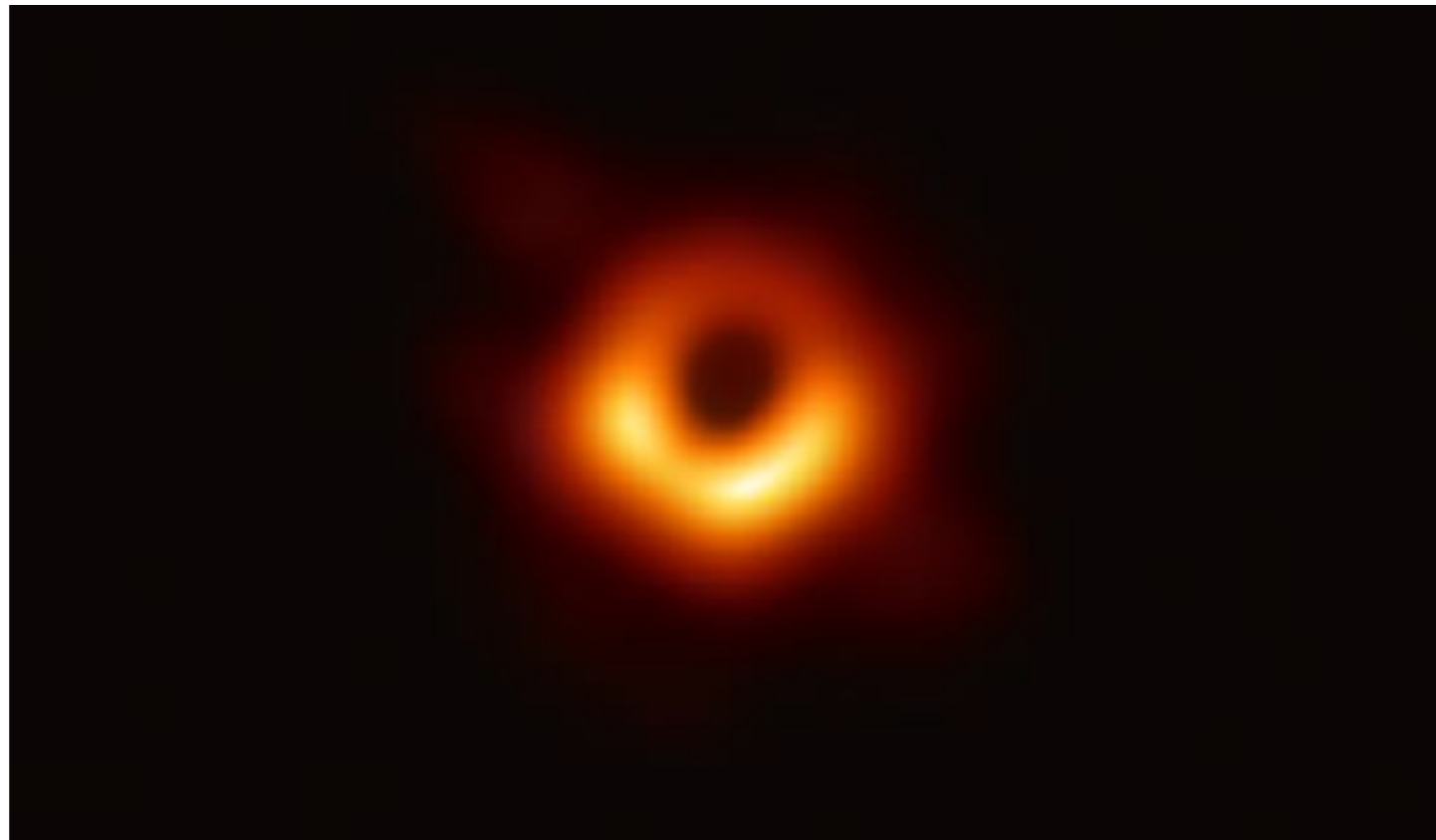
Program teleskop horyzontów zdarzeń
Event Horizon Telescope 2019



<https://eventhorizontelescope.org>

Bezpośrednia obserwacja

**Program teleskop horyzontów zdarzeń
Event Horizon Telescope 2019**



Czarna dziura, centrum galaktyki Panny A (Messier 87)

<https://eventhorizontelescope.org>

Niezwykłe własności czasoprzestrzeni w pobliżu czarnej dziury

Podstawowa własność czarnej dziury

Z wnętrza czarnej dziury nie wychodzi na zewnątrz żadna informacja, sygnał, ani materia.

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Nigdy nie zobaczy niczego wpadającego do czarnej dziury.

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Nigdy nie zobaczy niczego wpadającego do czarnej dziury.

Ciało zmierzające w stronę czarnej dziury obserwowane z zewnątrz nigdy do niej nie wpada - pozornie zastyga w pobliżu jej powierzchni.

Dopiero gdy astronautka zdecyduje się sama wskoczyć do czarnej dziury, wszystkie zastygnięte obiekty ożyją i wpadną tam przed nią.

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Nigdy nie zobaczy niczego wpadającego do czarnej dziury.

Ciało zmierzające w stronę czarnej dziury obserwowane z zewnątrz nigdy do niej nie wpada - pozornie zastyga w pobliżu jej powierzchni.

Dopiero gdy astronautka zdecyduje się sama wskoczyć do czarnej dziury, wszystkie zastygnięte obiekty ożyją i wpadną tam przed nią.

Dzieje się tak, dlatego, że powierzchnia czarnej dziury pędzi na astronautkę z prędkością światła a astronautka przed nią ucieka ze stałym przyspieszeniem.

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Nigdy nie zobaczy niczego wpadającego do czarnej dziury.

Ciało zmierzające w stronę czarnej dziury obserwowane z zewnątrz nigdy do niej nie wpada - pozornie zastyga w pobliżu jej powierzchni.

Dopiero gdy astronautka zdecyduje się sama wskoczyć do czarnej dziury, wszystkie zastygnięte obiekty ożyją i wpadną tam przed nią.

Dzieje się tak, dlatego, że powierzchnia czarnej dziury pędzi na astronautkę z prędkością światła a astronautka przed nią ucieka ze stałym przyspieszeniem.

Wszystkie spadające na czarną dziurę obiekty same ciemnieją, przestają świecić. To wynik przesunięcia do czerwieni.

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

W miarę zbliżania się do czarnej dziury, będzie widziała ją coraz większą - czarna dziura będzie rosła znacznie szybciej niż inne obiekty.



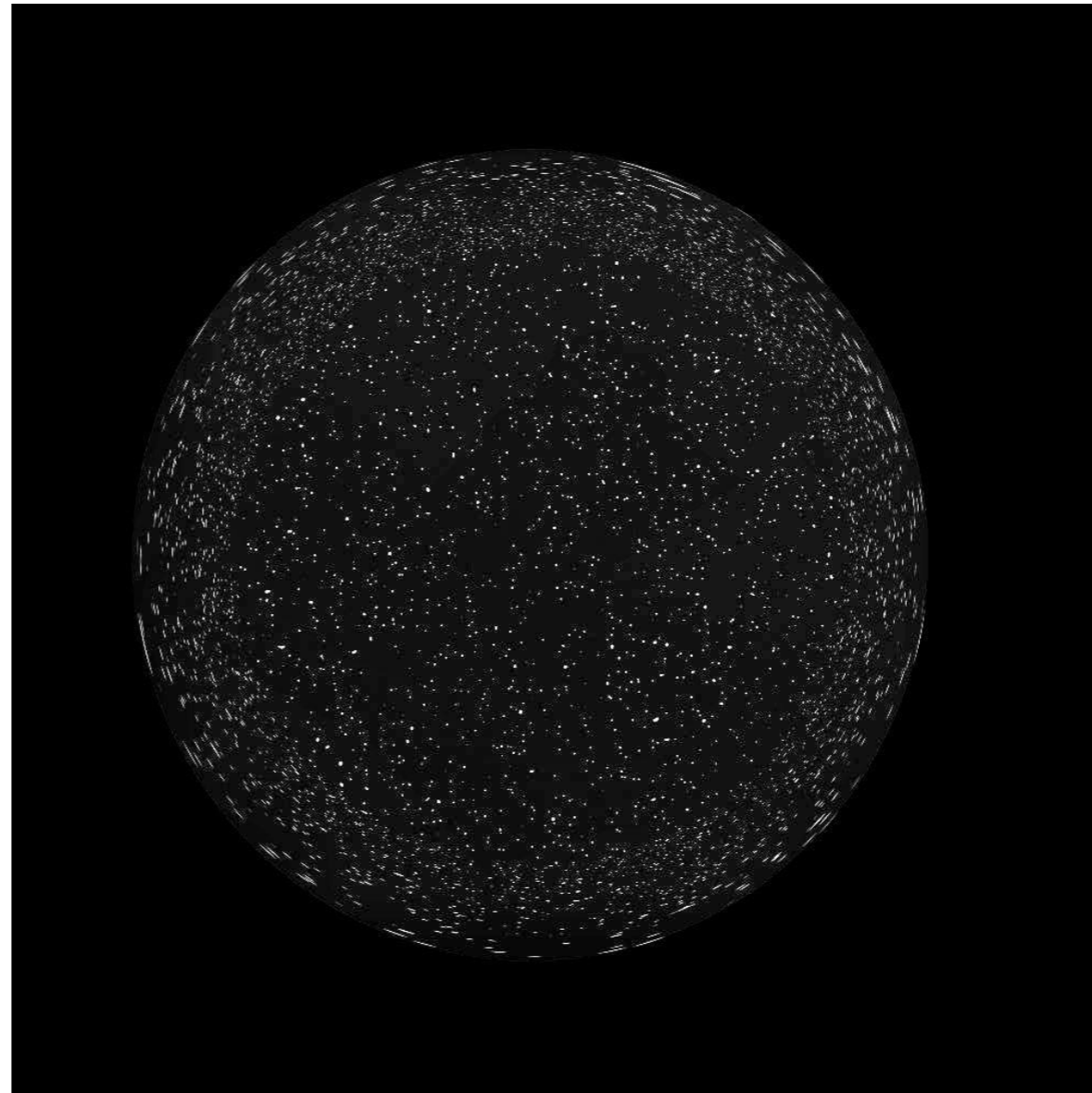
Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

W odległości od powierzchni czarnej dziury równej połowie jej promienia, czarna dziura przybierze wygląd nieskończonej czarnej płaszczyzny.



Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Jeśli kosmonautka będzie kontynuować zbliżanie do czarnej dziury, to czarna płaszczyzna obejmie ją niby wklęsła czarna czasza, a niebo przyjmie kształt jaśniejszego krążka nad głową



Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

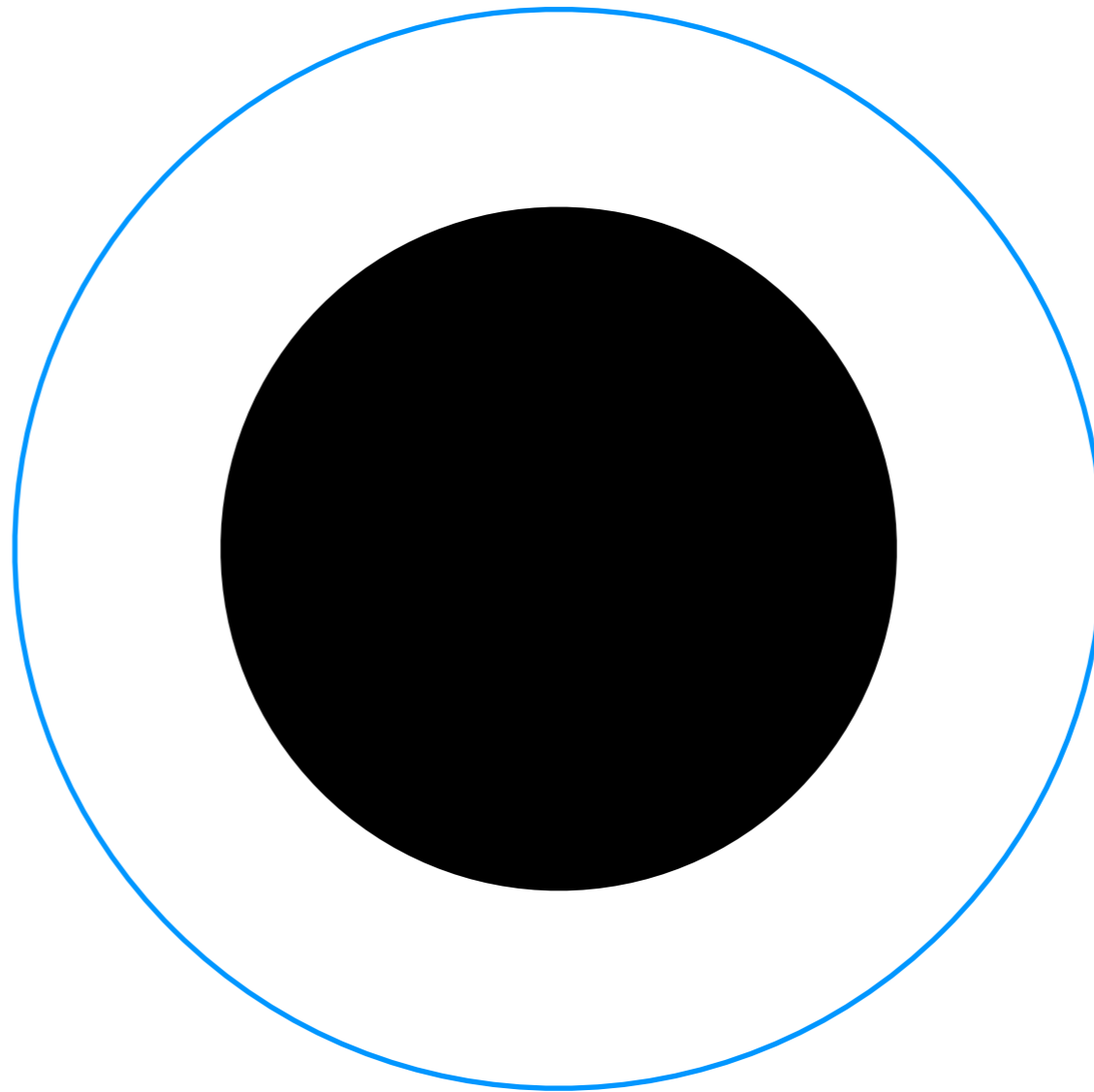
W pewnej odległości od powierzchni czarnej dziury (połowa jej promienia) znajduje się sfera świetlna.

Jeśli astronautka wypuści wiązkę światła w prawo, to wiązka wróci do niej z lewej strony po okrążeniu czarnej dziury.



Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

światło okrąży czarną dziurę
po kołowych orbitach o
promieniu $3/2$ promienia
czarnej dziury



Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Siła z jaką czarna dziura przyciąga astronautkę rośnie do nieskończoności w miarę zbliżania się do czarnej dziury.

Przeciwstawienia się jej zmiażdżyłoby astronautkę w pewnej odległości od powierzchni czarnej dziury.

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Siła z jaką czarna dziura przyciąga astronautkę rośnie do nieskończoności w miarę zbliżania się do czarnej dziury.

Przeciwstawienia się jej zmiażdżyłoby astronautkę w pewnej odległości od powierzchni czarnej dziury.

Paradoksalnie, siła potrzebna do utrzymania astronautki na baaardzo długiej linii byłaby skończona:

siła przyłożona do końca liny = masa astronautki razy $c^2 / 2$ promienie czarnej dziury

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Siła z jaką czarna dziura przyciąga astronautkę rośnie do nieskończoności w miarę zbliżania się do czarnej dziury.

Przeciwstawienia się jej zmiażdżyłoby astronautkę w pewnej odległości od powierzchni czarnej dziury.

Paradoksalnie, siła potrzebna do utrzymania astronautki na baaardzo długiej linii byłaby skończona:

$$\text{siła przyłożona do końca liny} = \text{masa astronautki razy } c^2 / 2 \text{ promienie czarnej dziury}$$

Prędkość obiektów mijających astronautkę w swobodnym spadku na czarną dziurę dąży do prędkości światła w miarę zbliżania się astronautki do czarnej dziury.

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do czarnej dziury?

Siła z jaką czarna dziura przyciąga astronautkę rośnie do nieskończoności w miarę zbliżania się do czarnej dziury.

Przeciwstawienia się jej zmiażdżyłoby astronautkę w pewnej odległości od powierzchni czarnej dziury.

Paradoksalnie, siła potrzebna do utrzymania astronautki na baaardzo długiej linii byłaby skończona:

$$\text{siła przyłożona do końca liny} = \text{masa astronautki razy } c^2 / 2 \text{ promienie czarnej dziury}$$

Prędkość obiektów mijających astronautkę w swobodnym spadku na czarną dziurę dąży do prędkości światła w miarę zbliżania się astronautki do czarnej dziury.

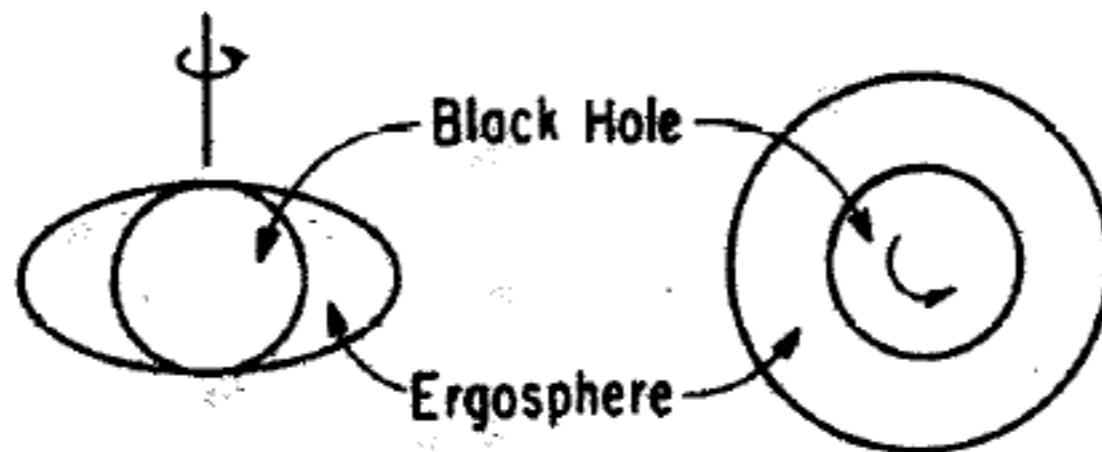
Powyższe zjawiska wynikają z różnego tempa upływu czasu w różnych odległościach od czarnej dziury.

Co widzi i czego doświadcza astronautka zbliżająca się do obracającej się czarnej dziury?

Jeśli czarna dziura się obraca, to aby spoczywać nieruchomo względem odległych obserwatorów, astronautka musi przeciwstawić się także sile bocznej.

Ta boczna siła szybko rośnie w pobliżu czarnej dziury i osiąga nieskończoną wartość już w pewnej odległości od czarnej dziury. Powierzchnię tę nazywamy ergosferą. Jej odległość od czarnej dziury zależy od kąta. W ergorejonie pomiędzy czarną dziurą a ergosferą każdy obiekt materialny musi krążyć wraz z czarną dziurą.

Dzieje się tak dlatego, że obracająca się czarna dziura porywa do obrotu otaczającą czasoprzestrzeń.

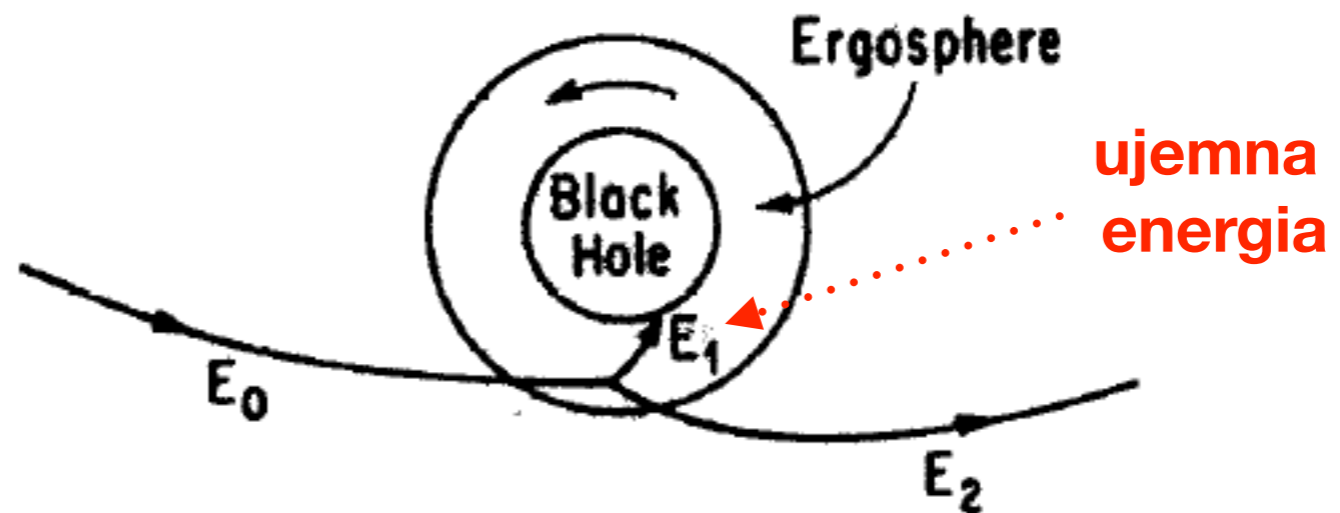


Proces Penrose'a

Z czarnej dziury można pompować energię kosztem jej ruchu obrotowego.

Wiązka promieniowania elektromagnetycznego przechodząca w pobliżu obracającej się czarnej dziury może przy pewnych parametrach zostać w wyniku przejścia wzmocniona.

Dzieje się tak dlatego, że w ergorejonie wiązka rozdziela się na dwie, jedną wiązkę o ujemnej energii wpadającą do czarnej dziury i drugą wylatującą o odpowiednio powiększonej energii - proces Penrose'a.



Niezwykłe własności czasoprzestrzeni wewnątrz czarnej dziury

Przekraczając horyzont

Do tej pory nasza astronautka spoczywała na jakiejś ustalonej wysokości nad czarną dziurą. Powiedzmy, że nagle latarka wymyka się jej z dłoni i spada w stronę czarnej dziury, a astronautka bez wahania rusza za nią. Co będzie widzieć, gdy latarka wpadnie do czarnej dziury. Czy latarka zniknie jej z oczu? Co zobaczy, gdy sama tam wpadnie?

Przekraczając horyzont

Do tej pory nasza astronautka spoczywała na jakiejś ustalonej wysokości nad czarna dziurą. Powiedzmy, że nagle latarka wymyka się jej z dłoni i spada w stronę czarnej dziury, a astronautka bez wahania rusza za nią. Co będzie widzieć, gdy latarka wpadnie do czarnej dziury. Czy latarka zniknie jej z oczu? Co zobaczy, gdy sama tam wpadnie?

W ferworze pogoni astronautka nawet nie zauważy momentu, kiedy będzie wpadać do czarnej dziury. Latarki ani na chwilę nie straci z oczu. Moment przekraczania powierzchni czarnej dziury nie będzie wyróżniał się niczym specjalnym.

W czarnej dziurze i istota kolapsu

Czasoprzestrzeń nie jest już statyczna, w każdym kierunku wydłuża się lub zwęża. Własność ta nadaje kolapsowi nieodwracalny charakter: kolapsuje nie tylko masywny obiekt, ale cała przestrzeń.

Światło lecące radialnie jest skupiane niezależnie od kierunku w którym leci.

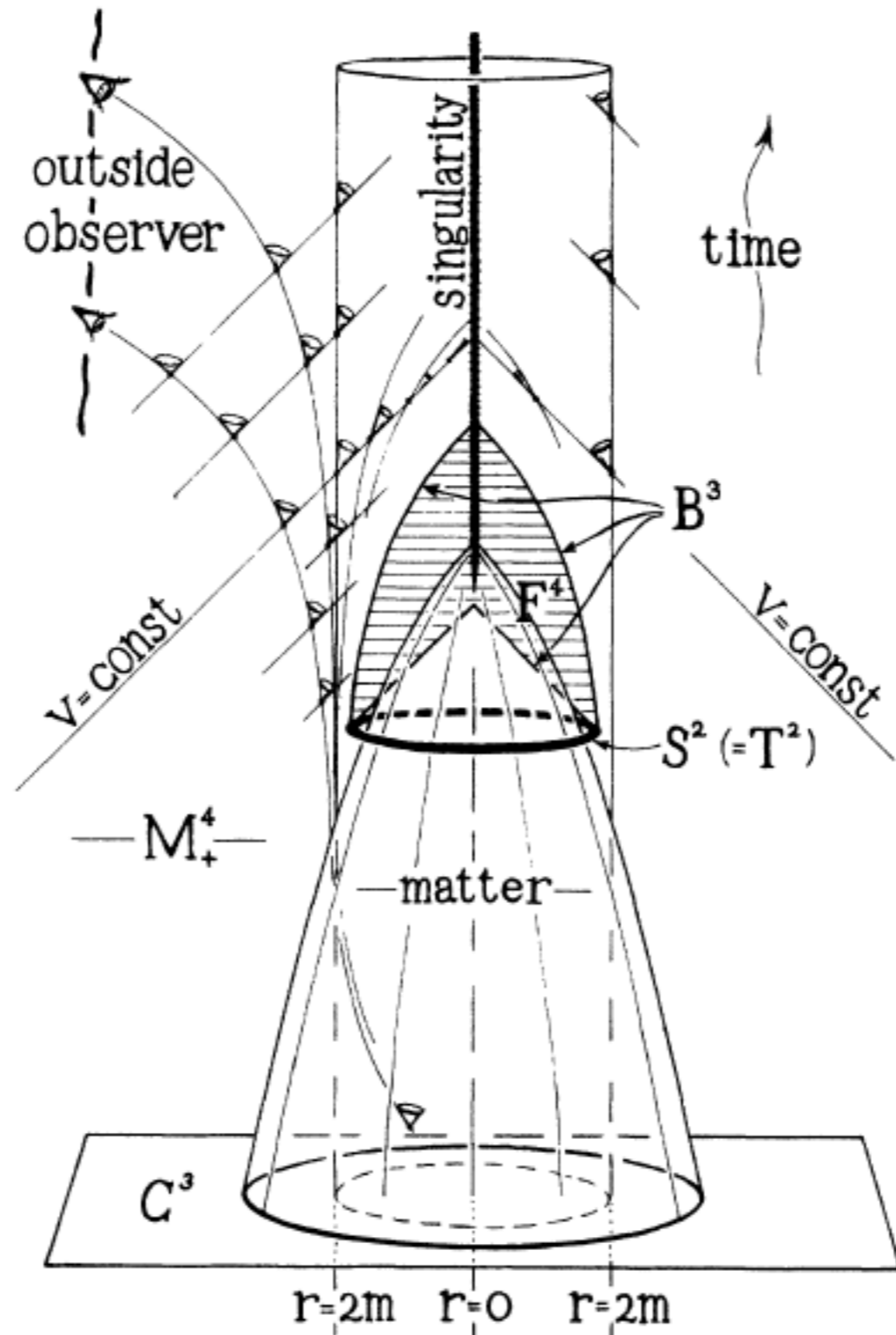


FIG. 1. Spherically symmetrical collapse (one space dimension suppressed). The diagram essentially also serves for the discussion of the asymmetrical case.

W czarnej dziurze

Czasoprzestrzeń nie jest już statyczna, w każdym kierunku wydłuża się lub zwęża. Własność ta nadaje kolapsowi nieodwracalny charakter: kolapsuje nie tylko masywny obiekt, ale cała przestrzeń.

Światło lecące radialnie jest skupiane niezależnie od kierunku w którym leci - jest złapane. To właśnie z tej własności Penrose wywnioskował nieuchronność powstawania w czasoprzestrzeni "osobliwosci" czyli wyrw, na których czasoprzestrzeń się kończy. Wyrwy te mogą przyjmować najrozmaitszą postać: albo krzywizna eksploduje, albo czasoprzestrzeń kończy się w jednej chwili czasu, albo w jakimś miejscu, albo kilka tych własności na raz.

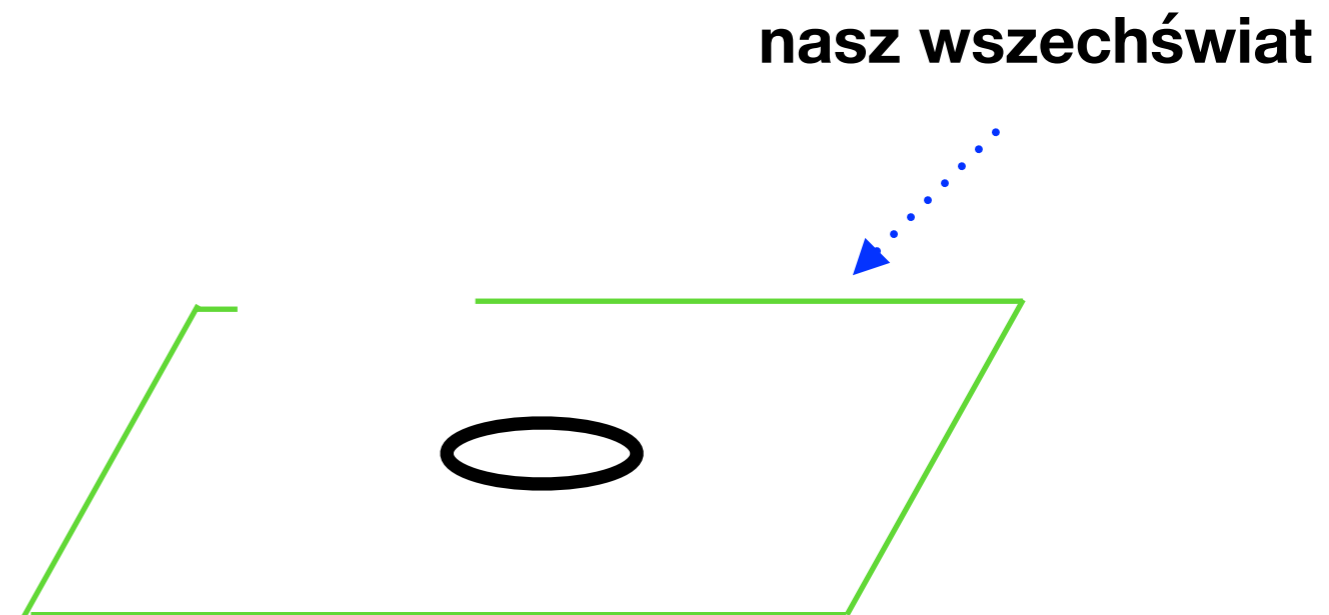
Nasz świat wpada w inną czasoprzestrzeń, inny świat wypełniony nową informacją, ewoluujący według nowych danych początkowych.

Nieobracająca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnie czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopią naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.

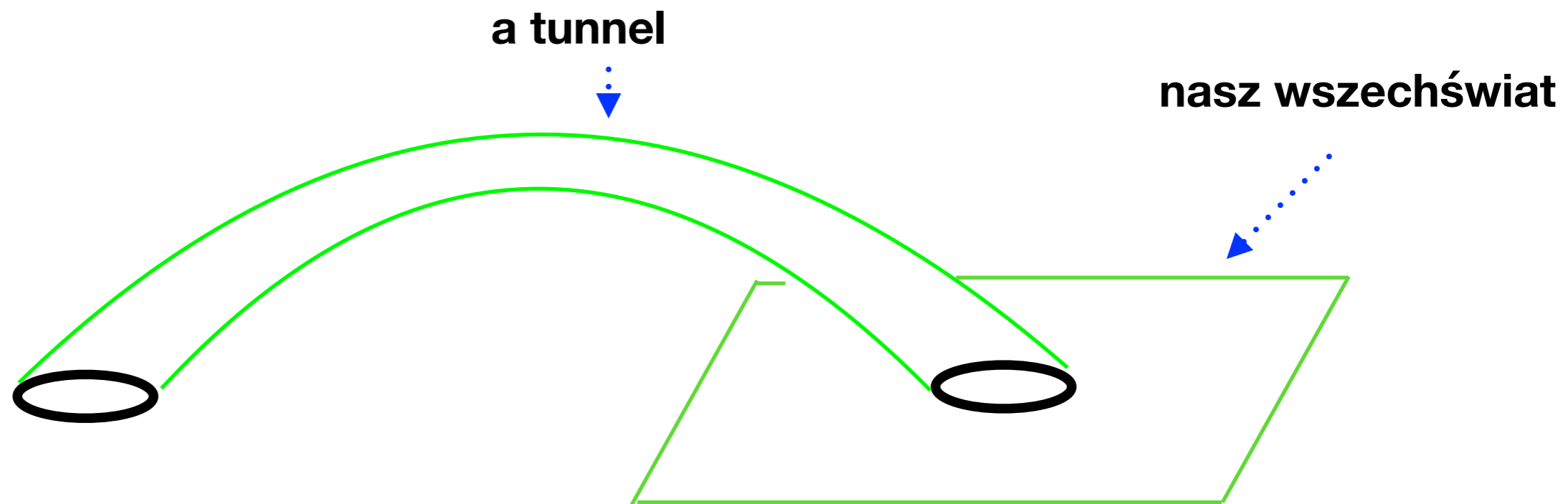
Nieobraca jąca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopia naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.



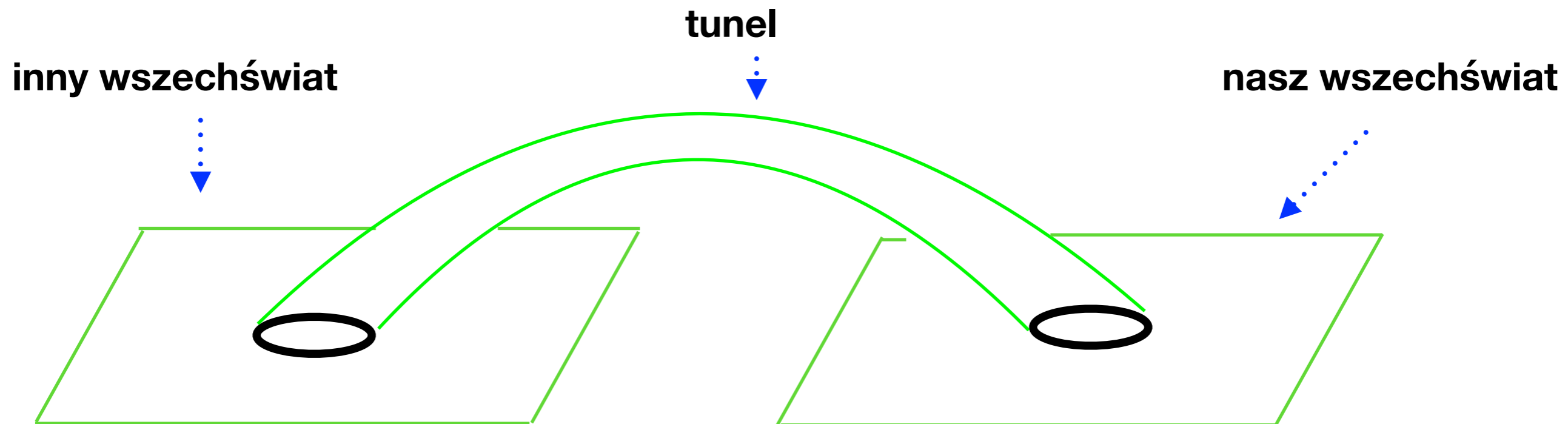
Nieobracaająca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopią naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.



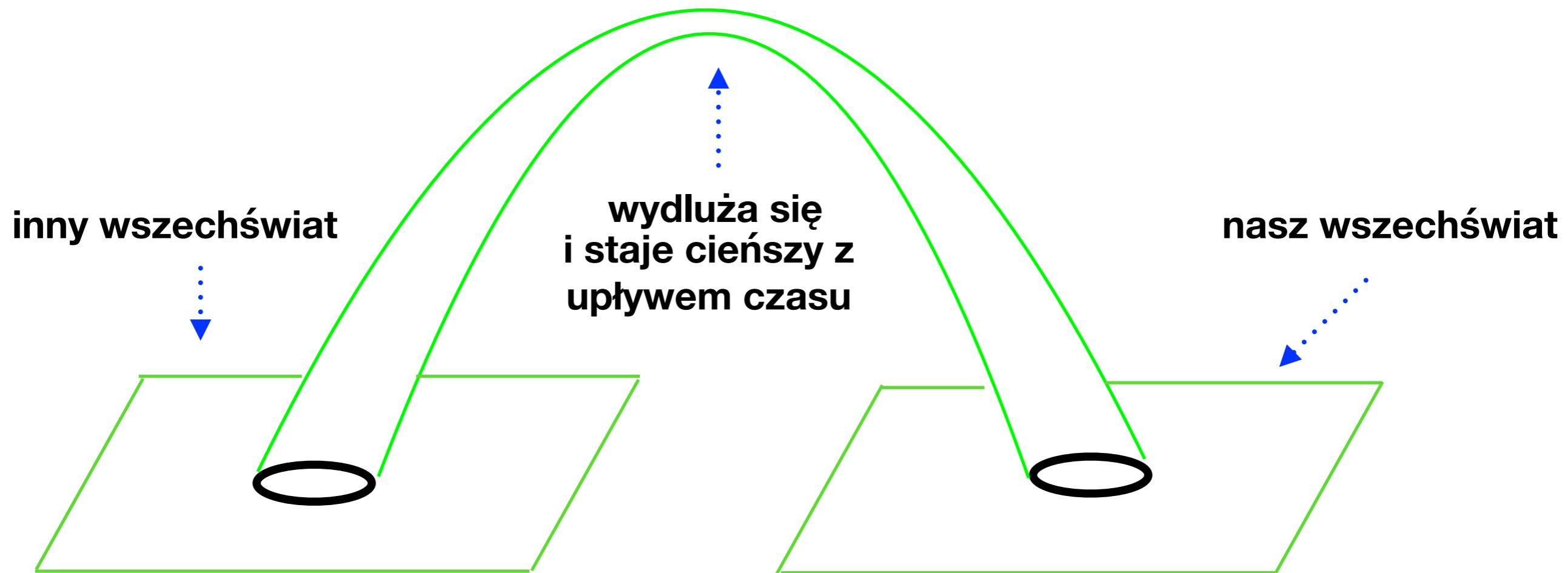
Nieobracająca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopią naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.



Nieobracająca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopia naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.



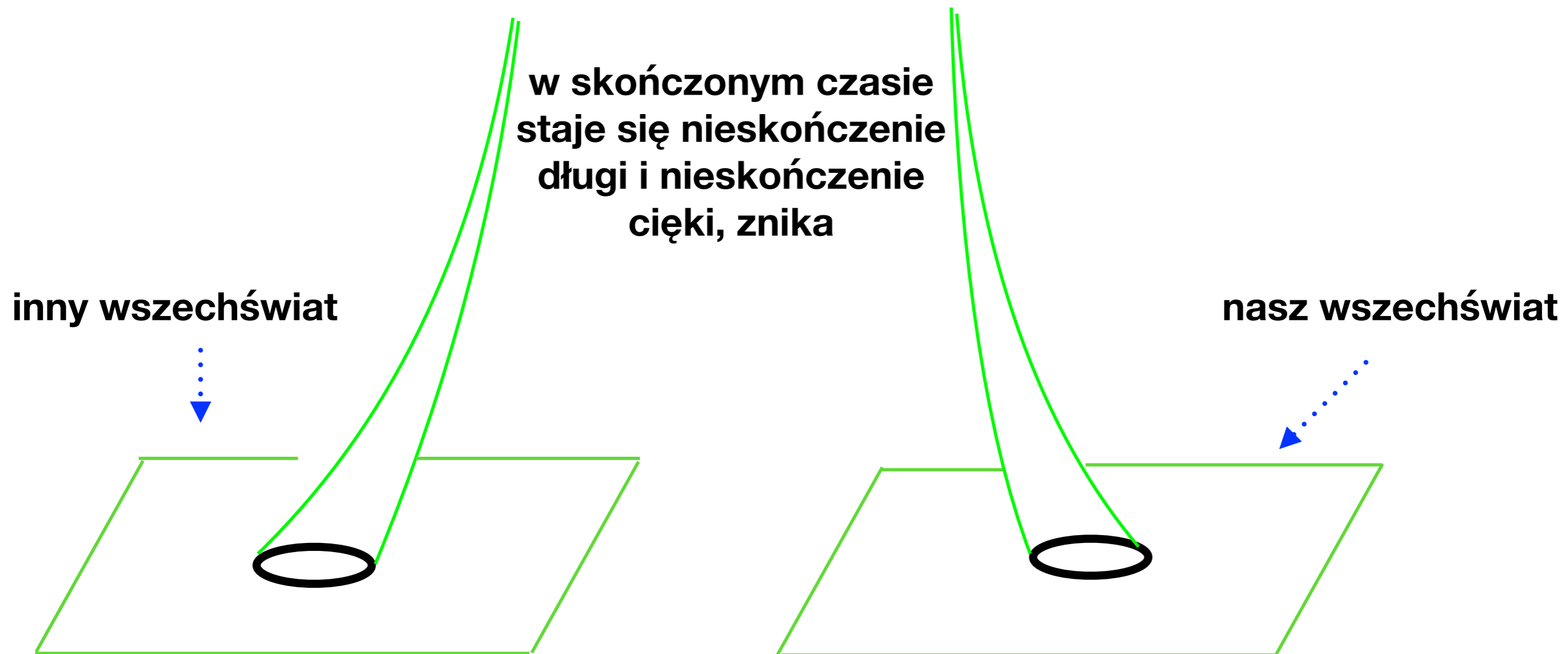
Nieobracająca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopią naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.



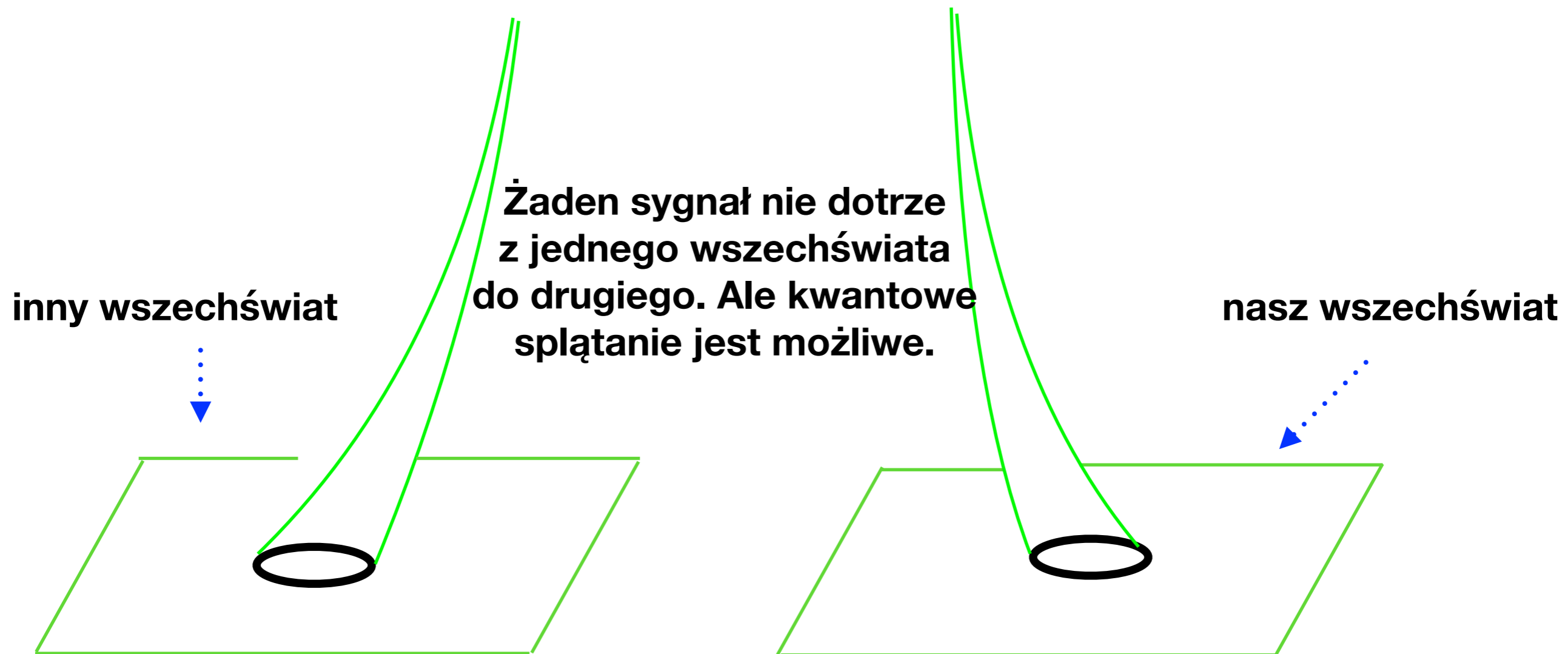
Nieobracająca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopią naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.



Nieobraca jąca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopią naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.



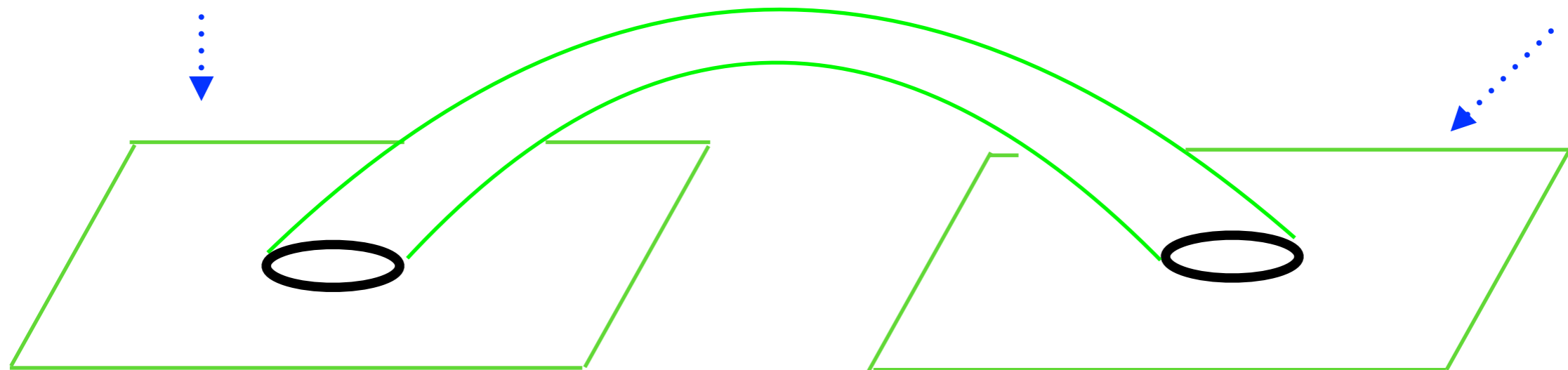
Nieobracająca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopią naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.

Astronautka w tunelu nigdy nie dotrze do innego świata. Zamiast tego zostanie rozciągnięta i ściśnięta - bez możliwości ucieczki.

inny wszechświat

nasz wszechświat



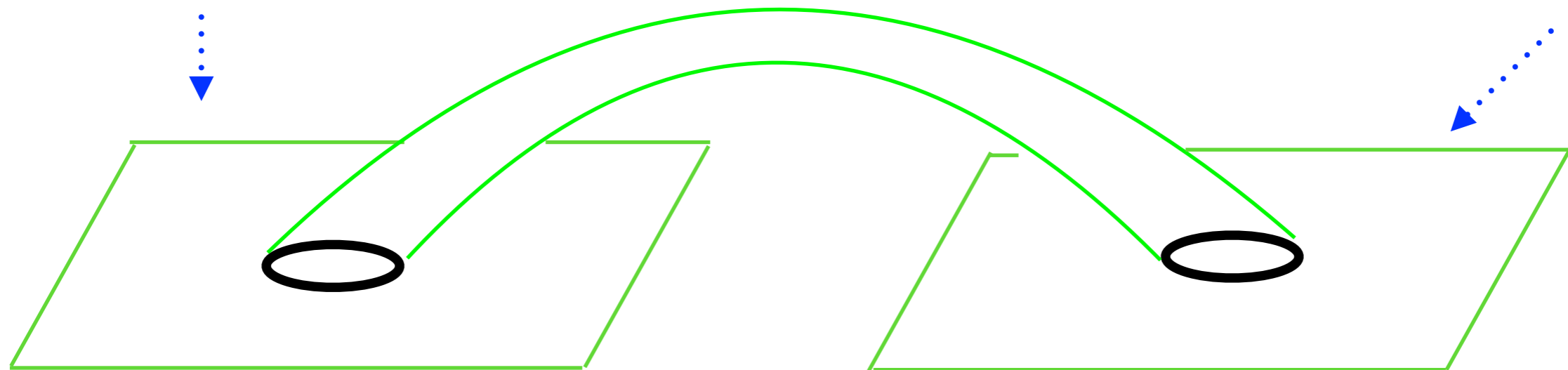
Nieobracająca się odwieczna czarna dziura most Einsteina-Rosena

Gdy astronautka przekracza powierzchnię czarnej dziury, przestrzeń przybiera formę tunelu. Tunel ten prowadzi do innego wszechświata. Geometrycznie, ten drugi wszechświat jest kopią naszego. Oczywiście, może mieć inną zawartość.

Jednak dwoje astronautów, jedno z naszego wszechświata a drugie z innego, mogą się spotkać w tunelu zanim obydwoje zostaną rozciągnięci i ściśnięci.

inny wszechświat

nasz wszechświat

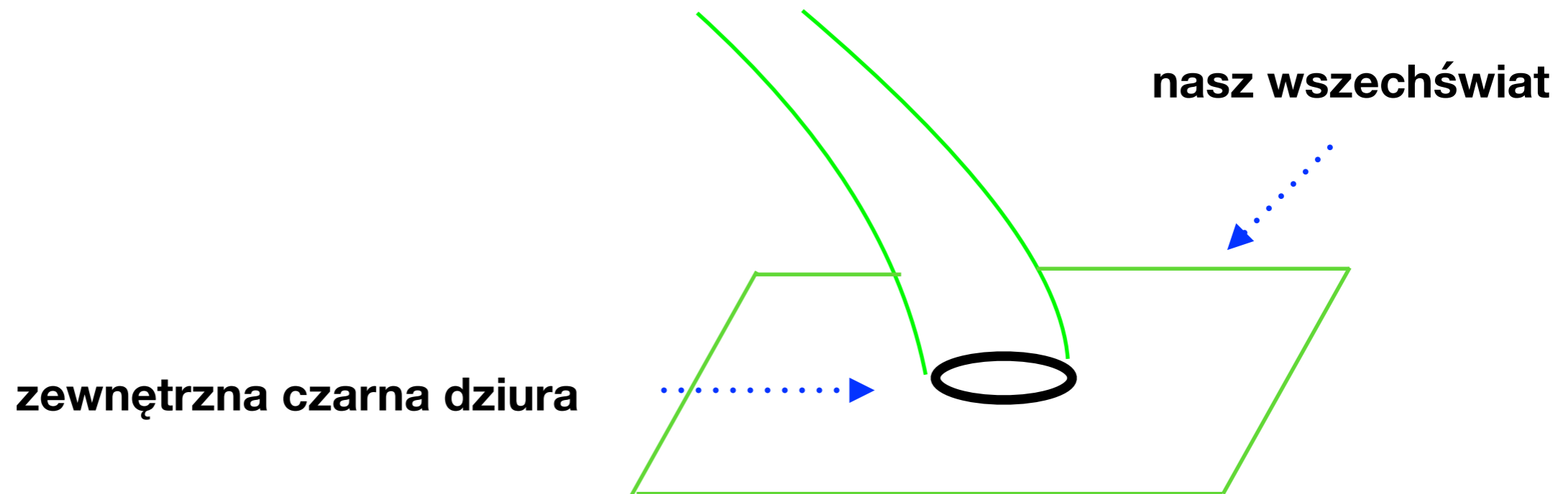


**Obracająca się odwieczna czarna dziura
druga, wewnętrzna czarna dziura**

Obracająca się odwieczna czarna dziura druga, wewnętrzna czarna dziura

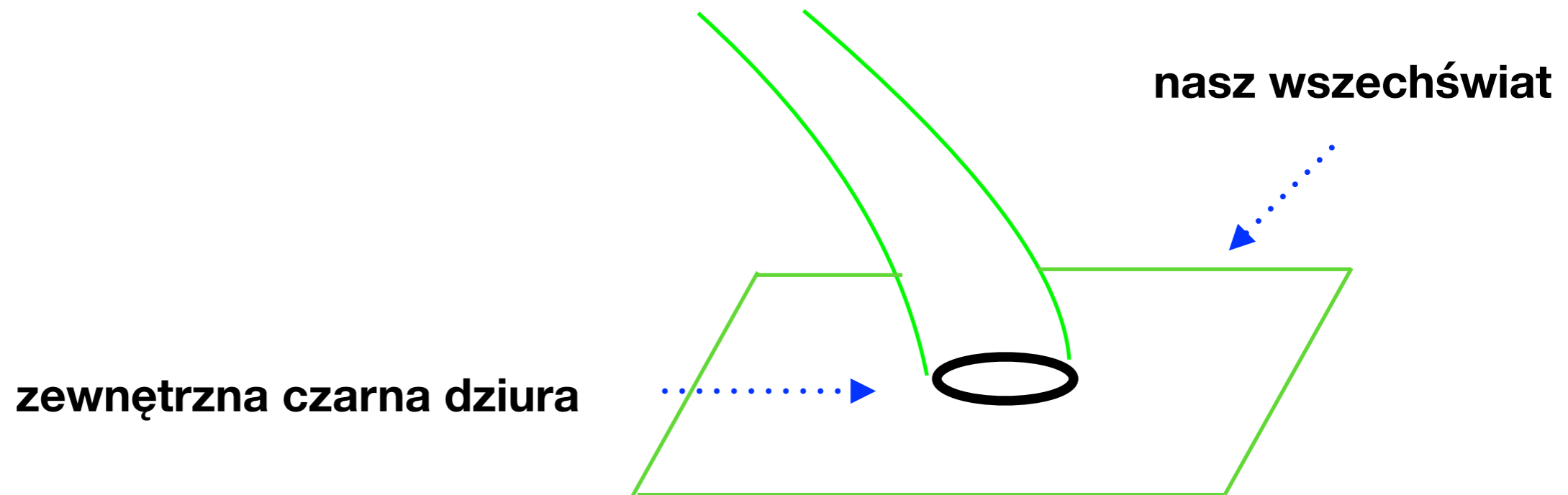
Wewnątrz czarnej dziury Astronautka zobaczy drugą czarna dziurę.

Obracająca się odwieczna czarna dziura druga, wewnętrzna czarna dziura



Obracająca się odwieczna czarna dziura druga, wewnętrzna czarna dziura

Wewnątrz czarnej dziury Astronautka zobaczy drugą czarna dziurę.



Obracająca się odwieczna czarna dziura druga, wewnętrzna czarna dziura

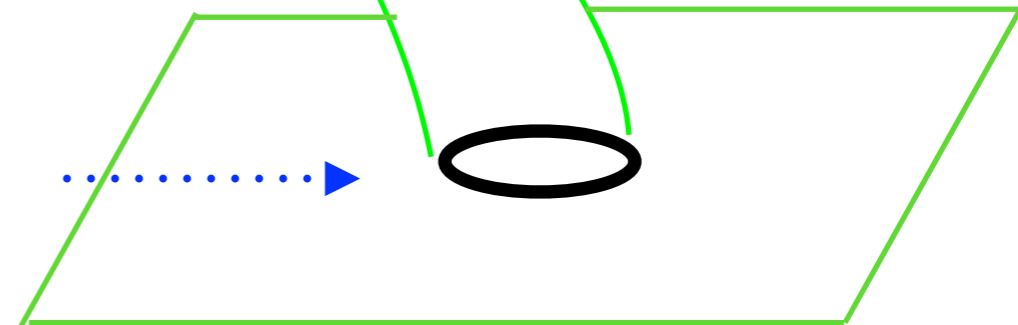
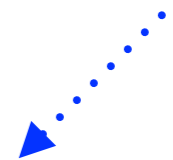
Wewnątrz czarnej dziury Astronautka zobaczy drugą czarna dziurę.

wewnętrzna czarna dziura

zewnątrzna czarna dziura

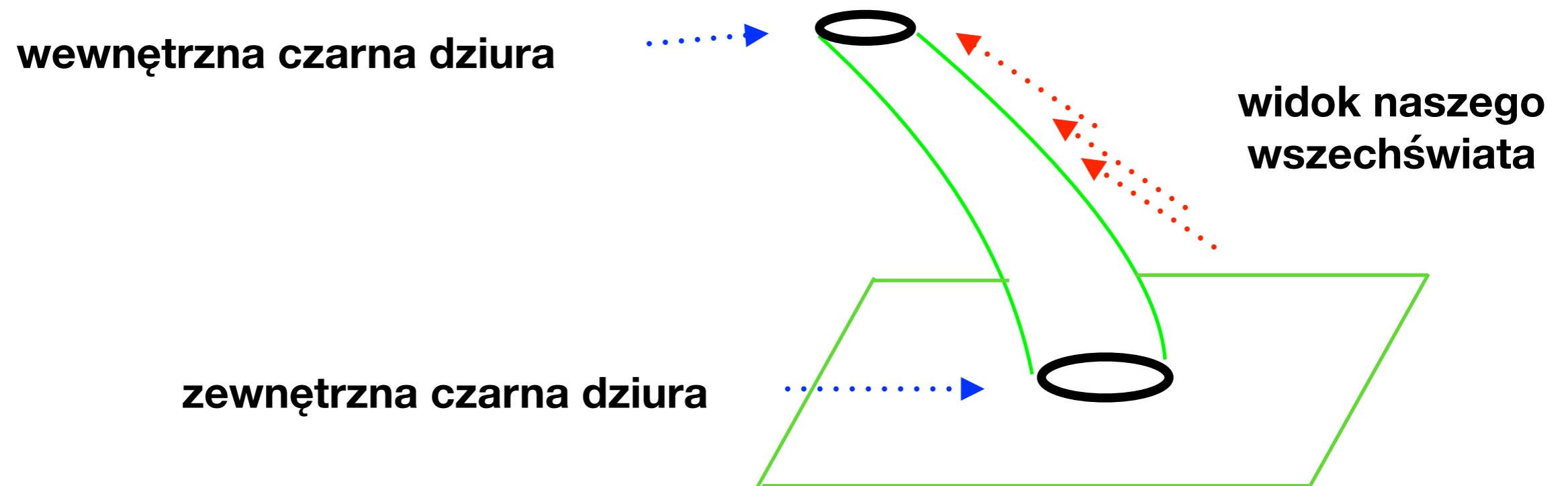


nasz wszechświat



Obracająca się odwieczna czarna dziura druga, wewnętrzna czarna dziura

Wewnątrz czarnej dziury Astronautka zobaczy drugą czarna dziurę.
Nadal będzie też widziała wszechświat, który pozostawiła.

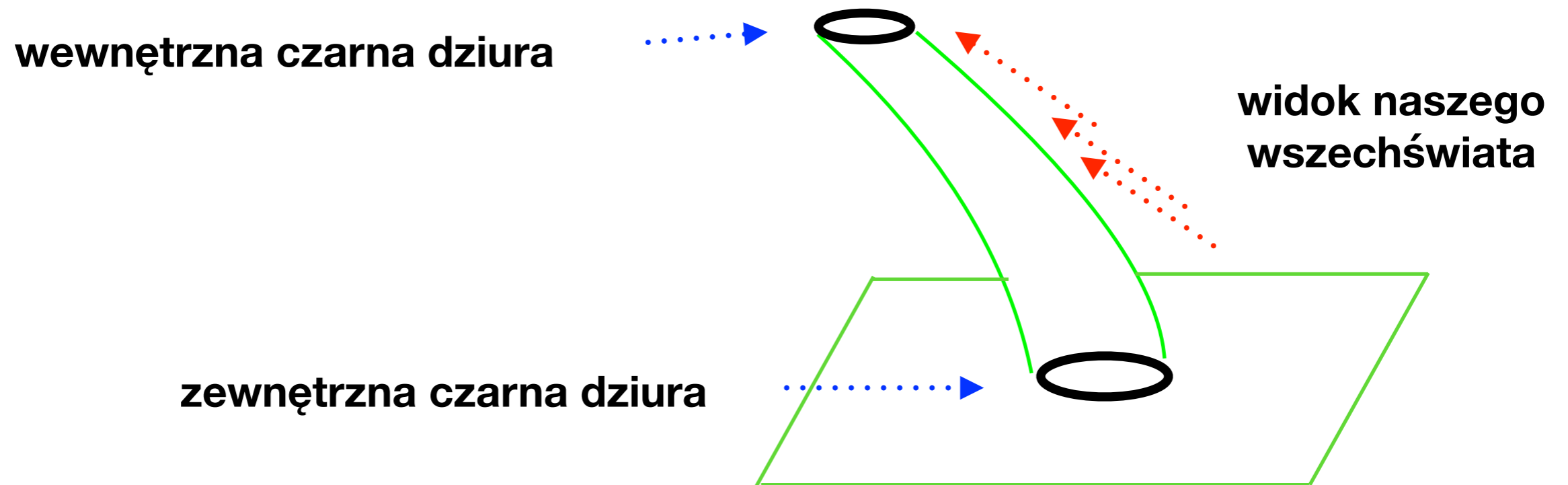


Obracająca się odwieczna czarna dziura druga, wewnętrzna czarna dziura

Wewnątrz czarnej dziury Astronautka zobaczy drugą czarna dziurę.

Nadal będzie też widziała wszechświat, który pozostawiła.

W miarę zbliżania się do wewnętrznej czarnej dziury, transmisja obrazu wszechświata zostanie przyspieszona tak bardzo, że w ciągu jednej sekundy astronautki, upłynie milion lat widzianego wszechświata.



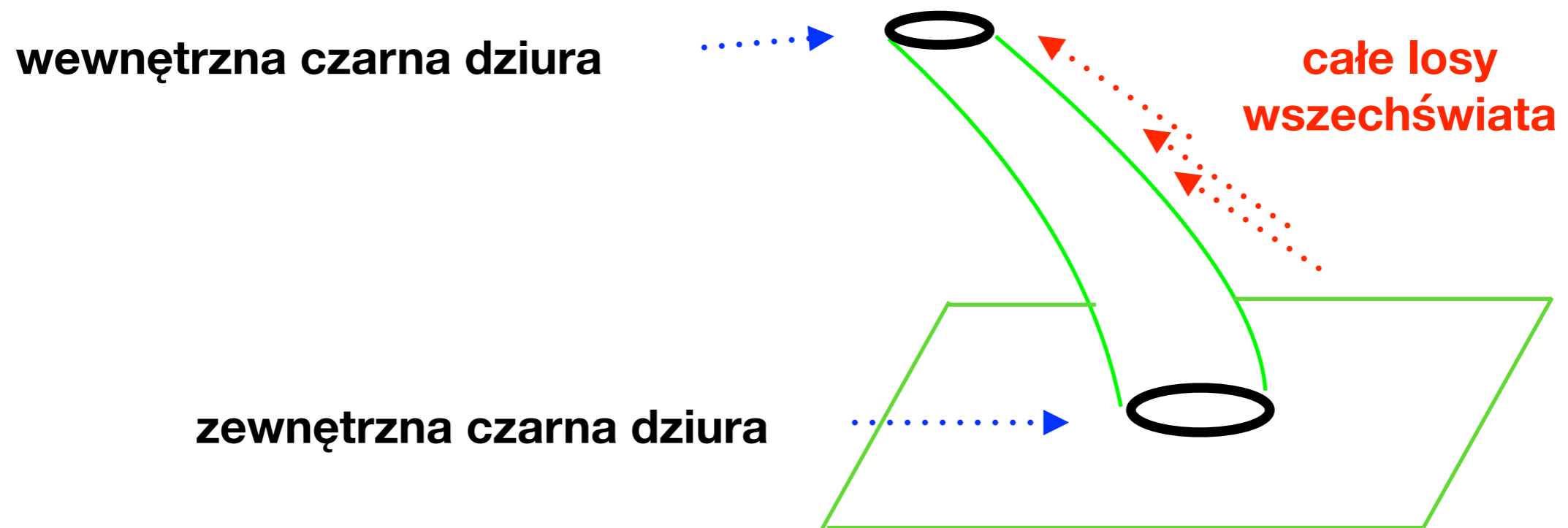
Obracająca się odwieczna czarna dziura druga, wewnętrzna czarna dziura

Wewnątrz czarnej dziury Astronautka zobaczy drugą czarna dziurę.

Nadal będzie też widziała wszechświat, który pozostawiła.

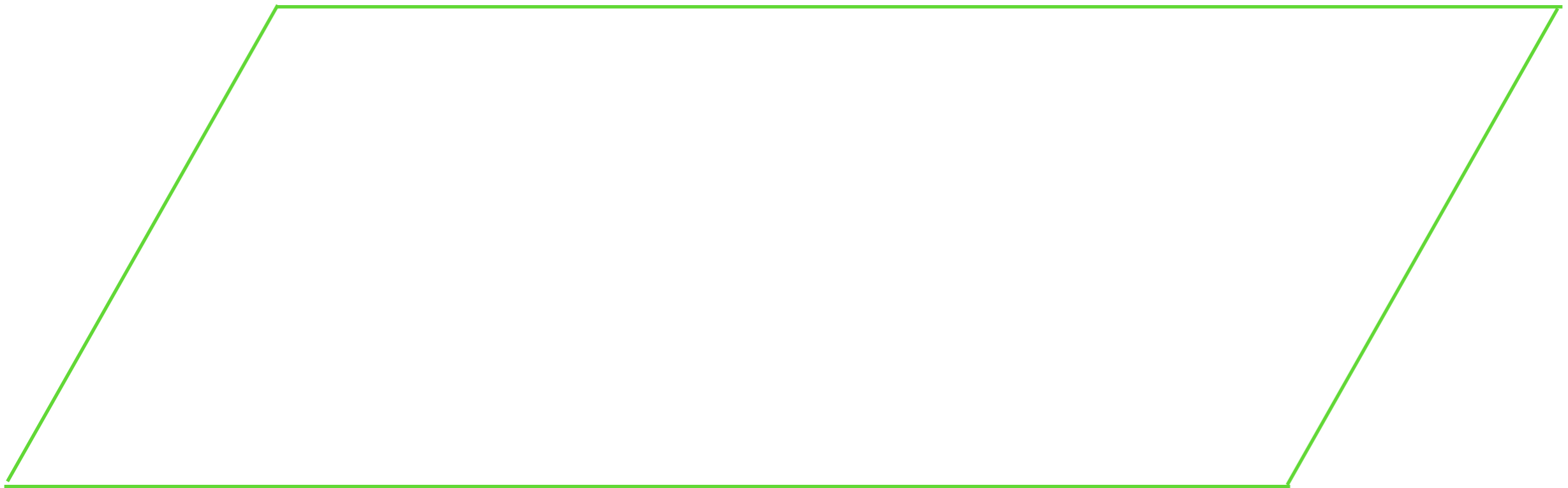
W miarę zbliżania się do wewnętrznej czarnej dziury, transmisja obrazu wszechświata zostanie przyspieszona tak bardzo, że w ciągu jednej sekundy astronautki, upłynie milion lat widzianego wszechświata.

Przekraczając drugą czarną dziurę, astronautka zobaczy całą przyszłość świata pozostawionego za sobą (który zgodnie z tym modelem jest wieczny).



Obracająca się odwieczna czarna dziura po przekroczeniu wewnętrznej czarnej dziury

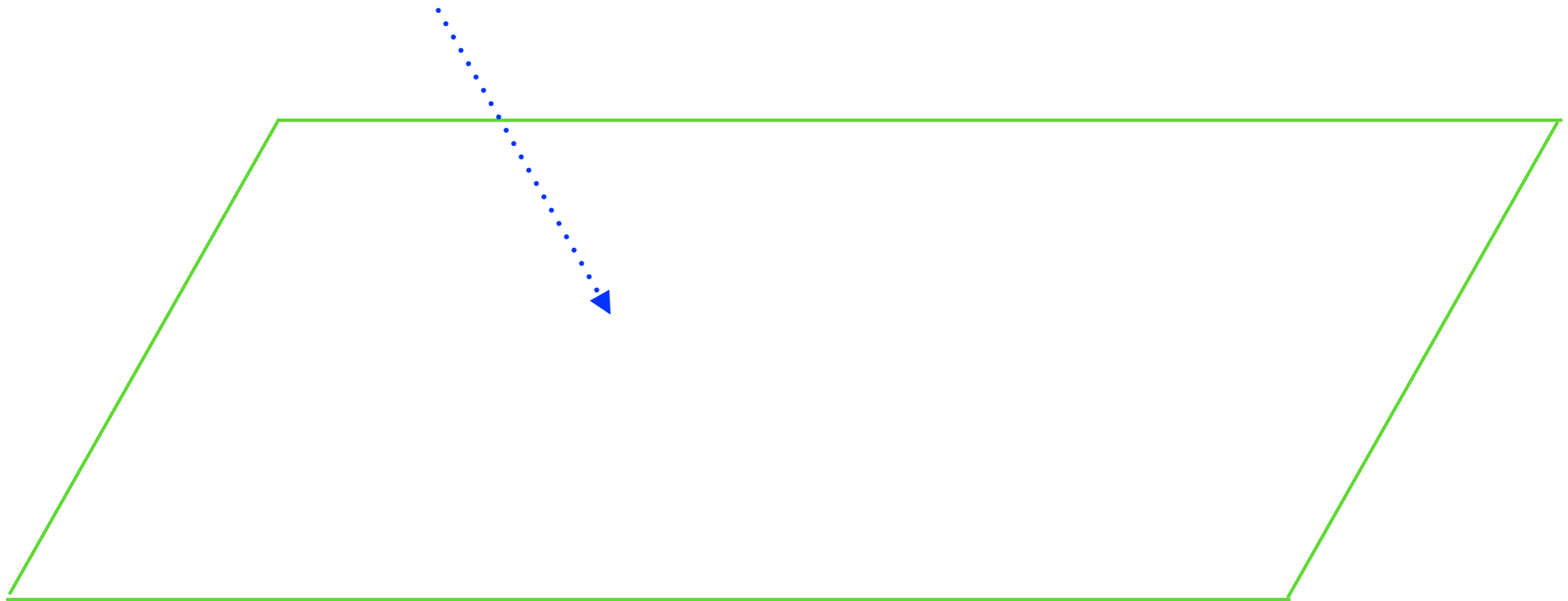
Wewnętrzna czarna dziura jest bramą do innych wszechświatów. Obserwator może, a nawet jest zmuszony przez dynamikę czasoprzestrzeni do jej przekroczenia.



Obracająca się odwieczna czarna dziura po przekroczeniu wewnętrznej czarnej dziury

Wewnętrzna czarna dziura jest bramą do innych wszechświatów. Obserwator może, a nawet jest zmuszony przez dynamikę czasoprzestrzeni do jej przekroczenia.

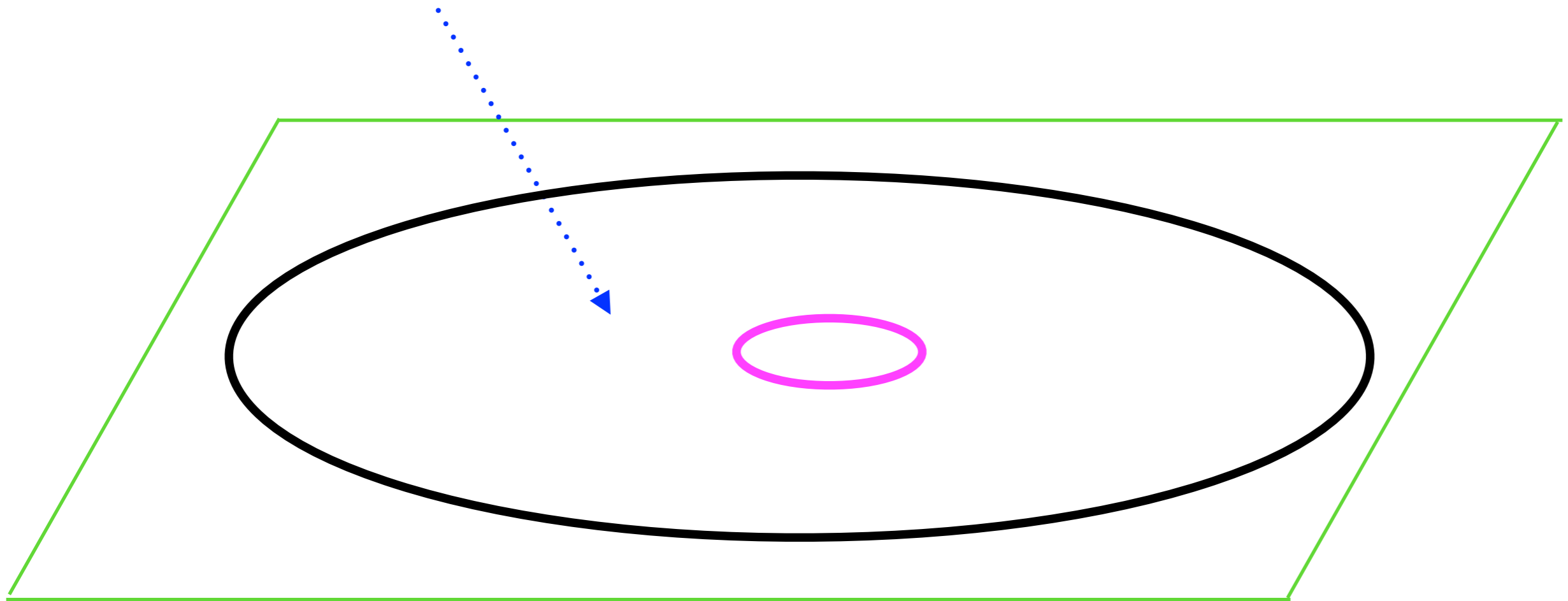
astronautka ląduje tutaj



Obracająca się odwieczna czarna dziura po przekroczeniu wewnętrznej czarnej dziury

Wewnętrzna czarna dziura jest bramą do innych wszechświatów. Obserwator może, a nawet jest zmuszony przez dynamikę czasoprzestrzeni do jej przekroczenia.

astronautka ląduje tutaj

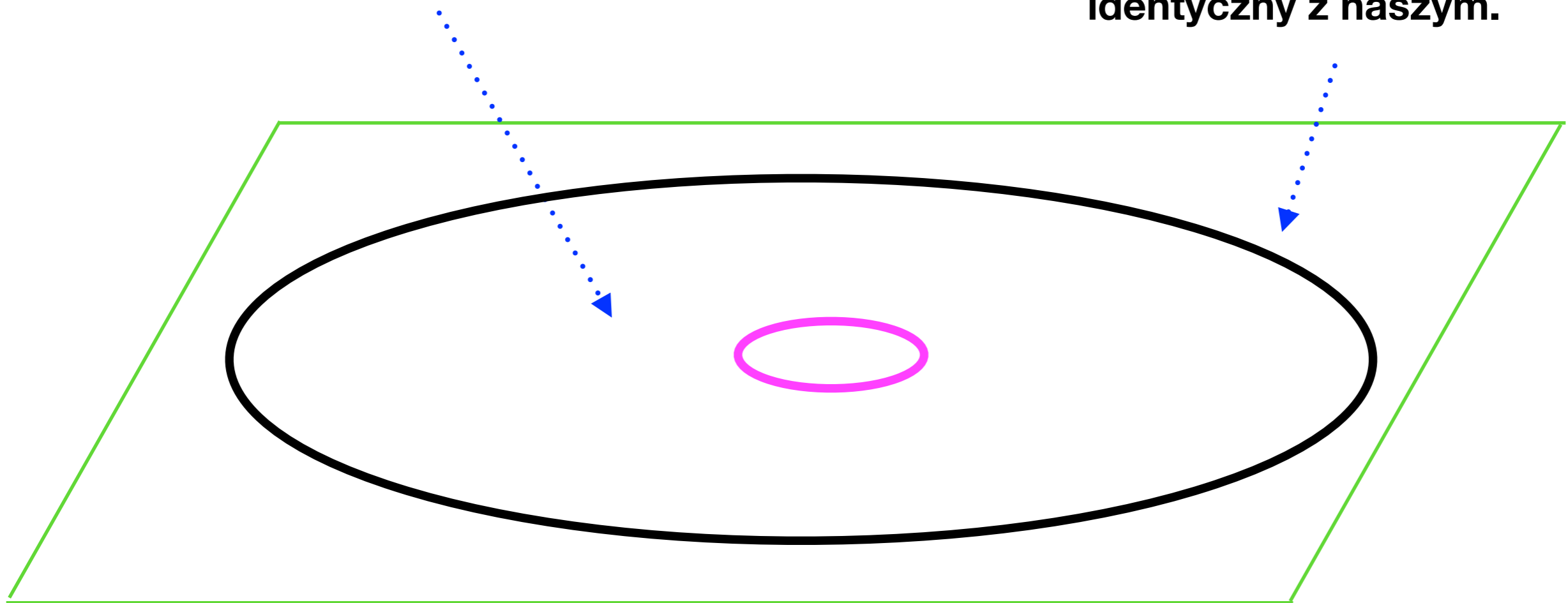


Obracająca się odwieczna czarna dziura po przekroczeniu wewnętrznej czarnej dziury

Wewnętrzna czarna dziura jest bramą do innych wszechświatów. Obserwator może, a nawet jest zmuszony przez dynamikę czasoprzestrzeni do jej przekroczenia.

Nic nie dochodzi z za tej sfery.
Po jej przekroczeniu astronautka
znajdzie nowy wszechświat,
identyczny z naszym.

astronautka ląduje tutaj

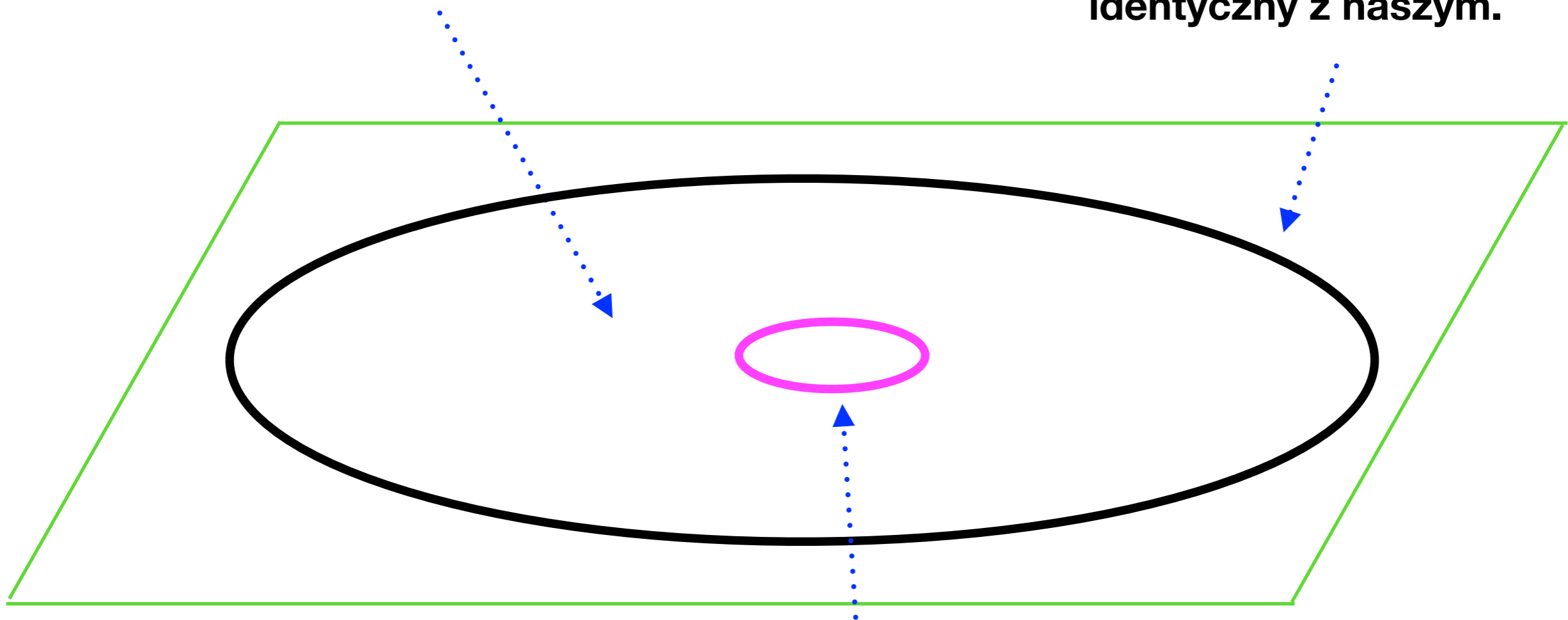


Obracająca się odwieczna czarna dziura po przekroczeniu wewnętrznej czarnej dziury

Wewnętrzna czarna dziura jest bramą do innych wszechświatów. Obserwator może, a nawet jest zmuszony przez dynamikę czasoprzestrzeni do jej przekroczenia.

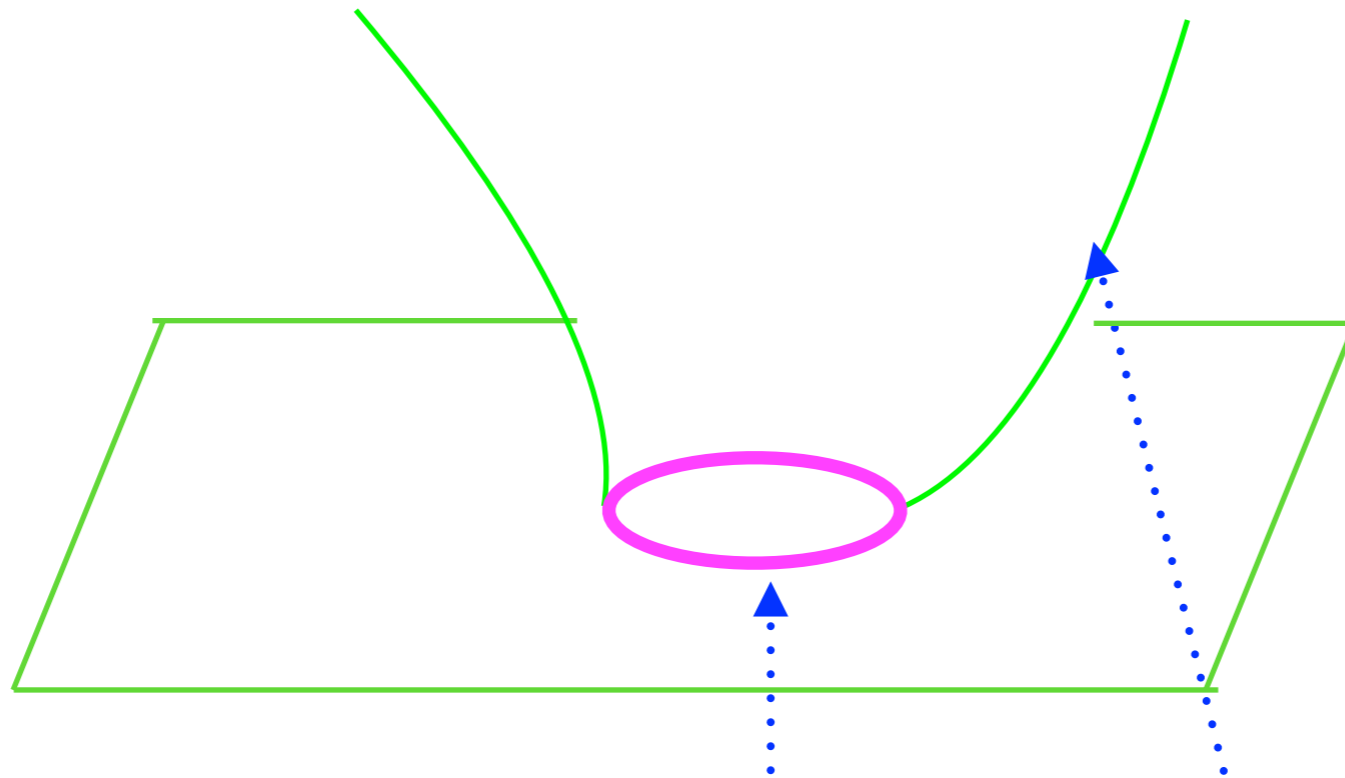
Nic nie dochodzi z za tej sfery.
Po jej przekroczeniu astronautka
znajdzie nowy wszechświat,
identyczny z naszym.

astronautka ląduje tutaj



brama do jeszcze jednego, niezmiernie dziwnego wszechświata

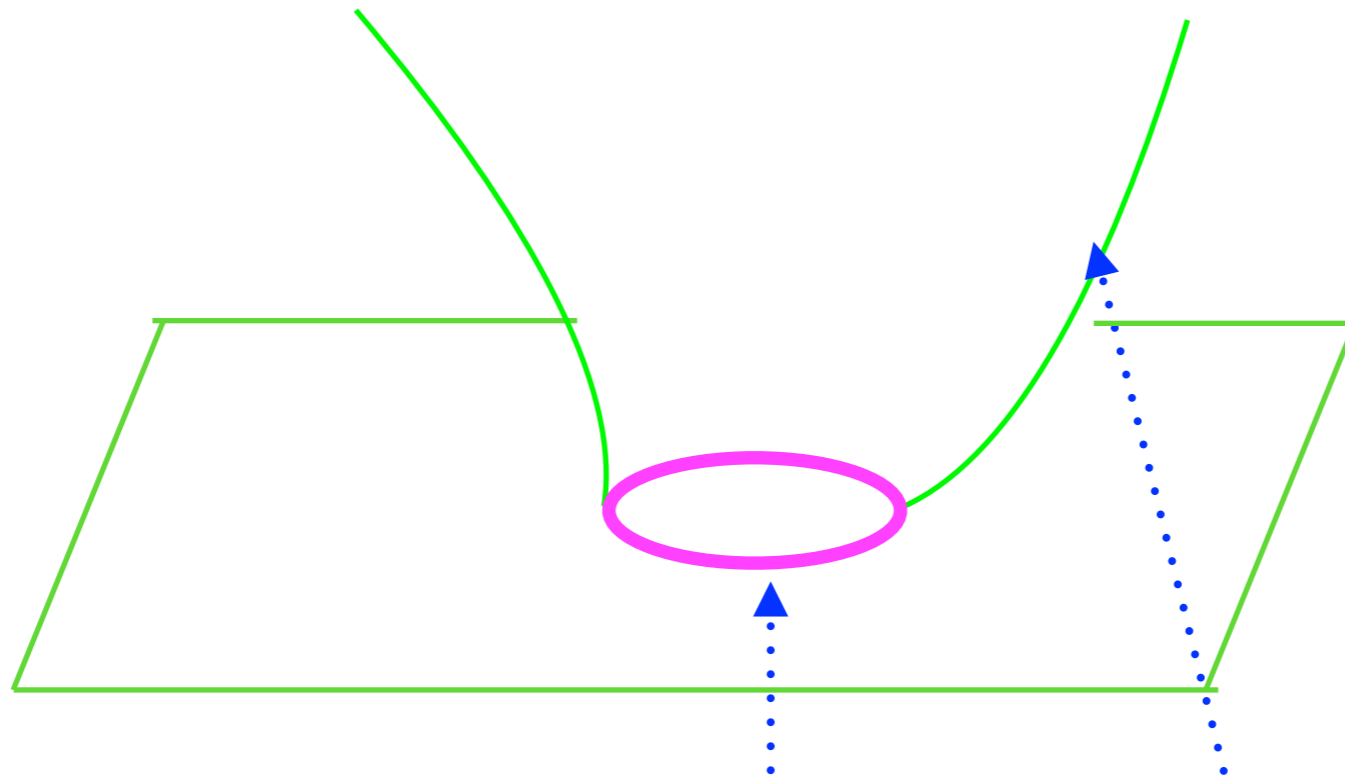
Obracająca się odwieczna czarna dziura świat wewnętrzny



brama do jeszcze jednego, niezmiernie dziwnego wszechświata

Obracająca się odwieczna czarna dziura świat wewnętrzny

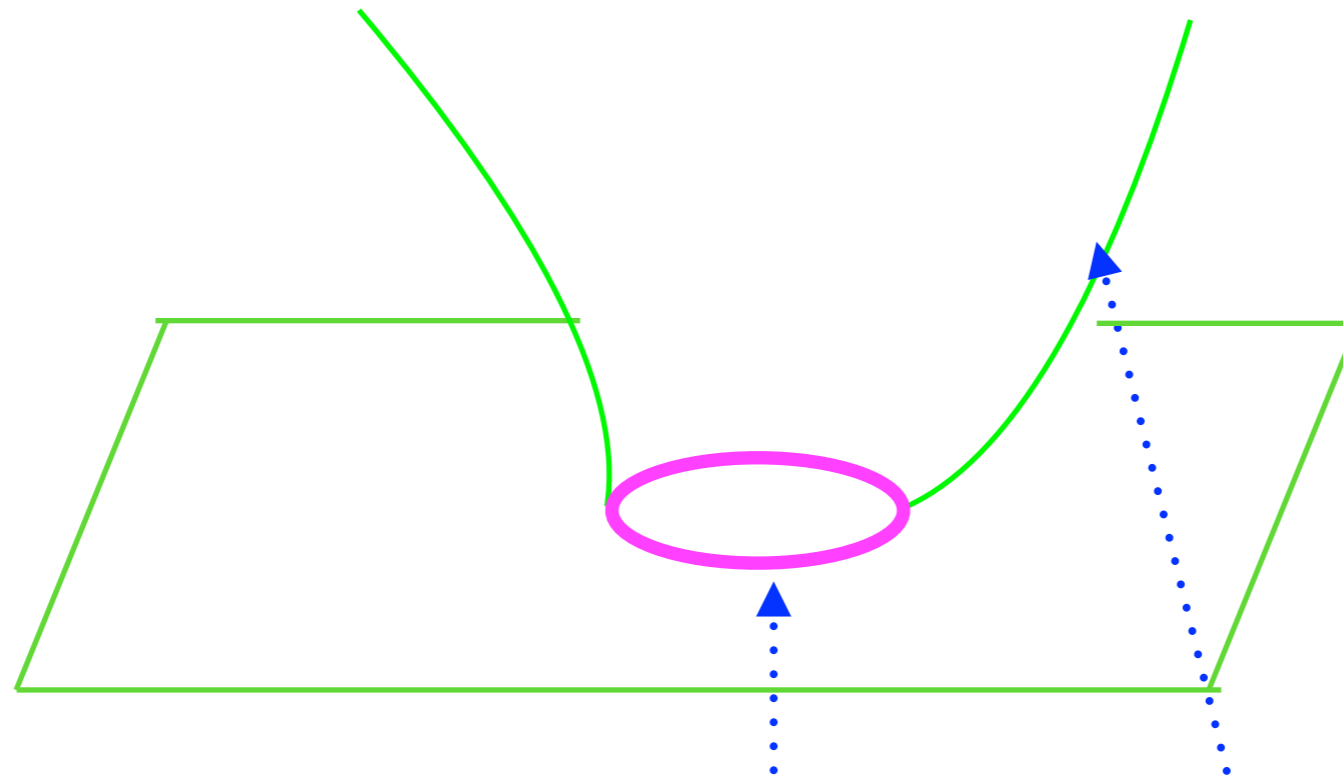
Ten wszechświat sprawia wrażenie, jakby w jego centrum znajdowała się ujemna masa



brama do jeszcze jednego, niezmiernie dziwnego wszechświata

Obracająca się odwieczna czarna dziura świat wewnętrzny

Ten wszechświat sprawia wrażenie, jakby w jego centrum znajdowała się ujemna masa - materialne ciała są odpychane

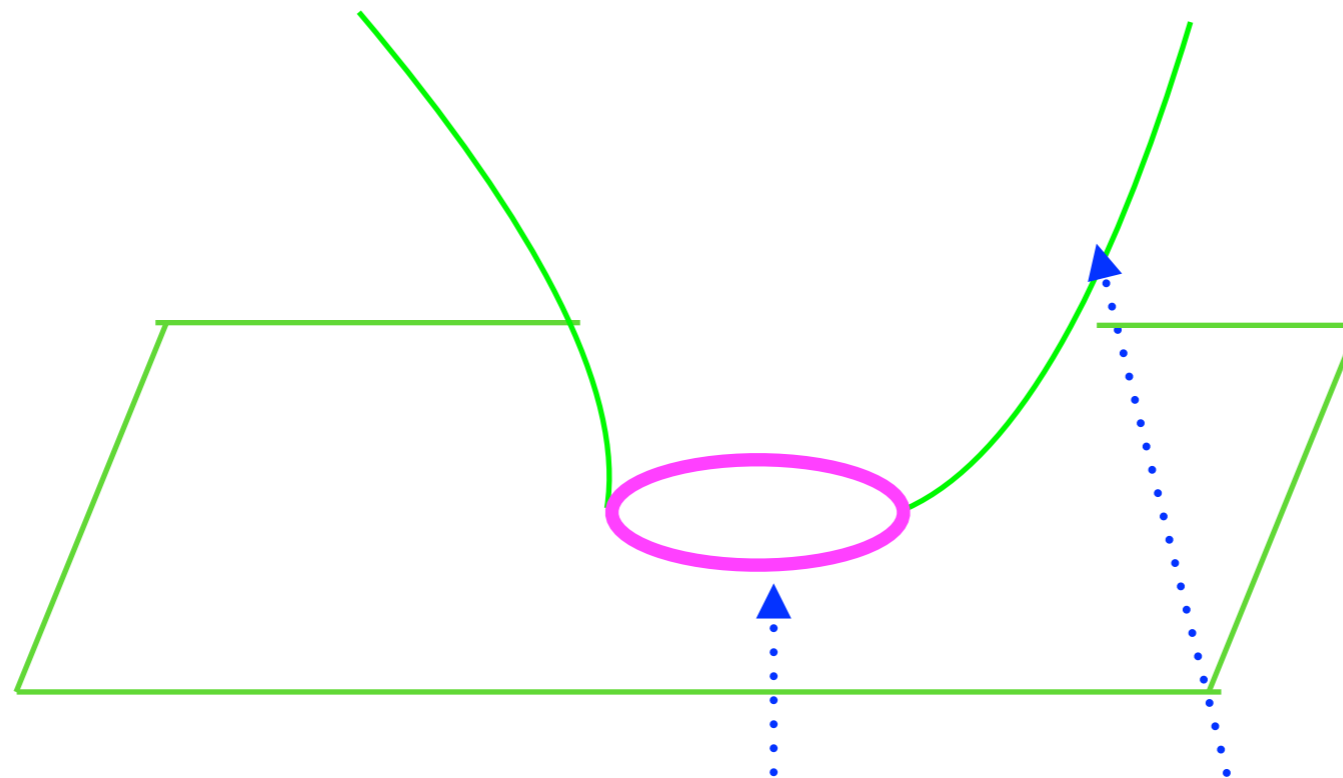


brama do jeszcze jednego, niezmiernie dziwnego wszechświata

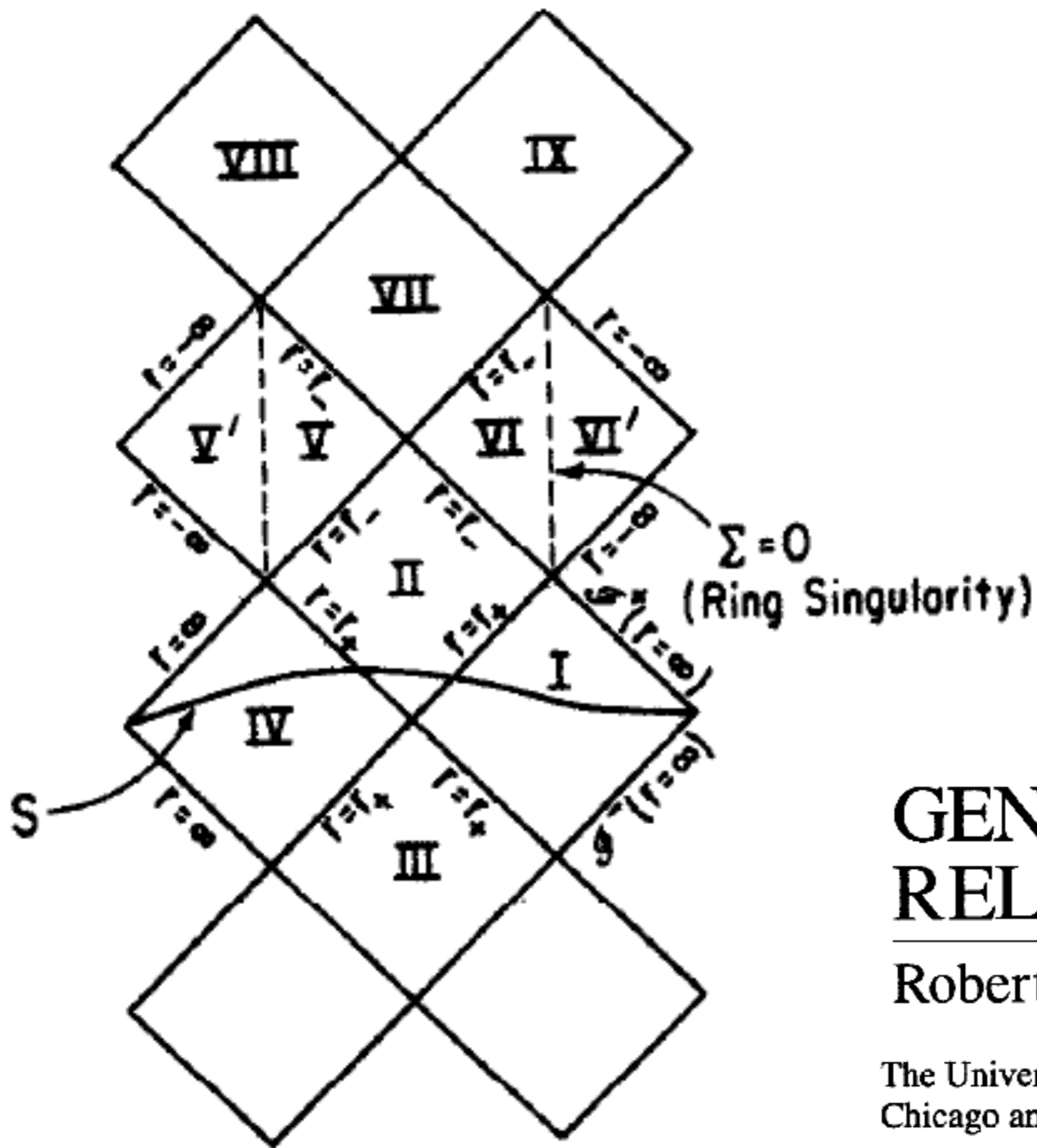
Obracająca się odwieczna czarna dziura świat wewnętrzny

Ten wszechświat sprawia wrażenie, jakby w jego centrum znajdowała się ujemna masa - materialne ciała są odpychane

Pewien obszar tego świata może być wykorzystany jako maszyna czasu: "Carter's time machine". Dokładniej, dla dowolnej pary wydarzeń (A,B) istnieje krzywa czasowa, zorientowana w przyszłość, taka że A jest początkiem a B końcem i to samo jest prawdą dla pary (B,A).



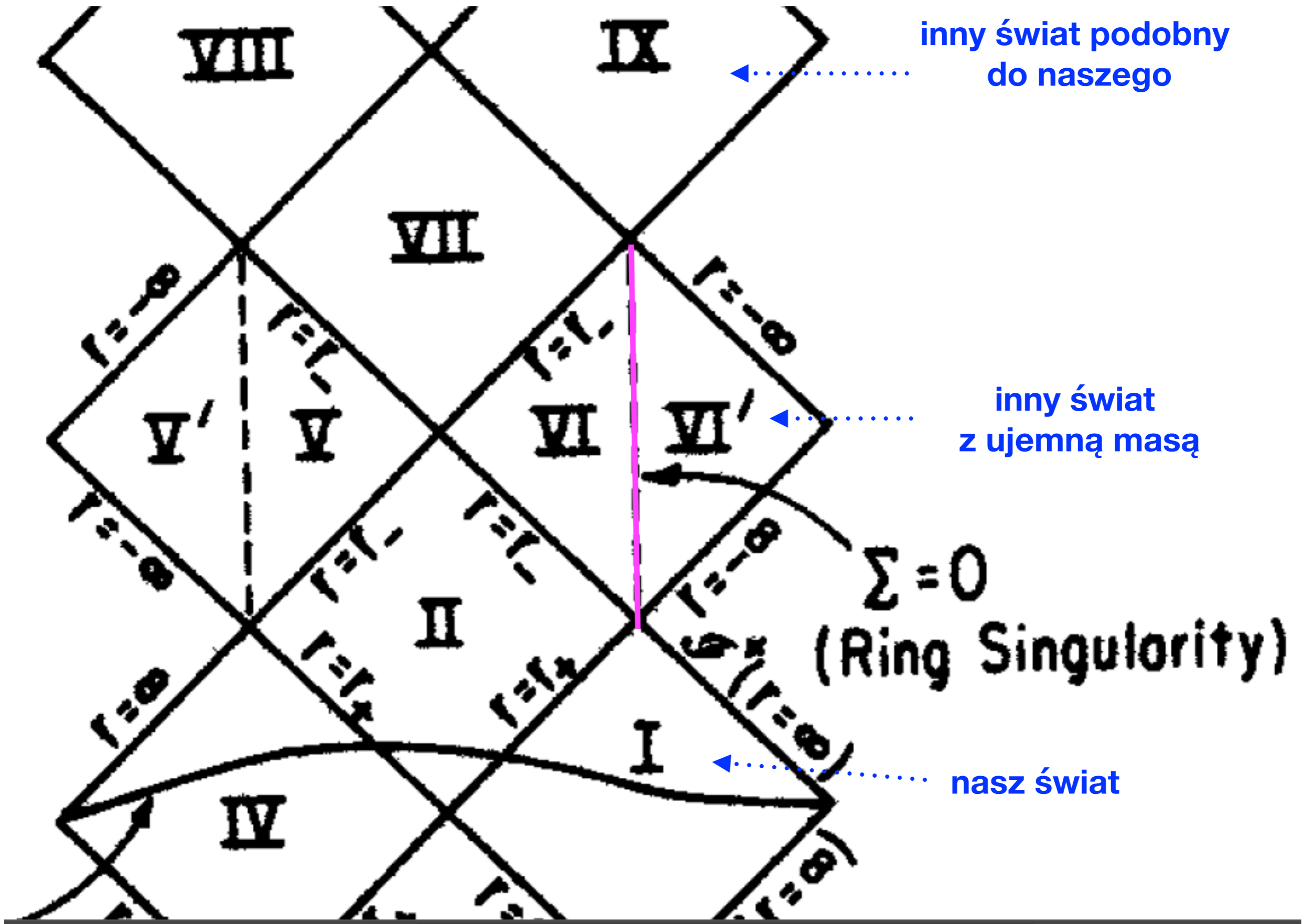
brama do jeszcze jednego, niezmiernie dziwnego wszechświata



GENERAL RELATIVITY

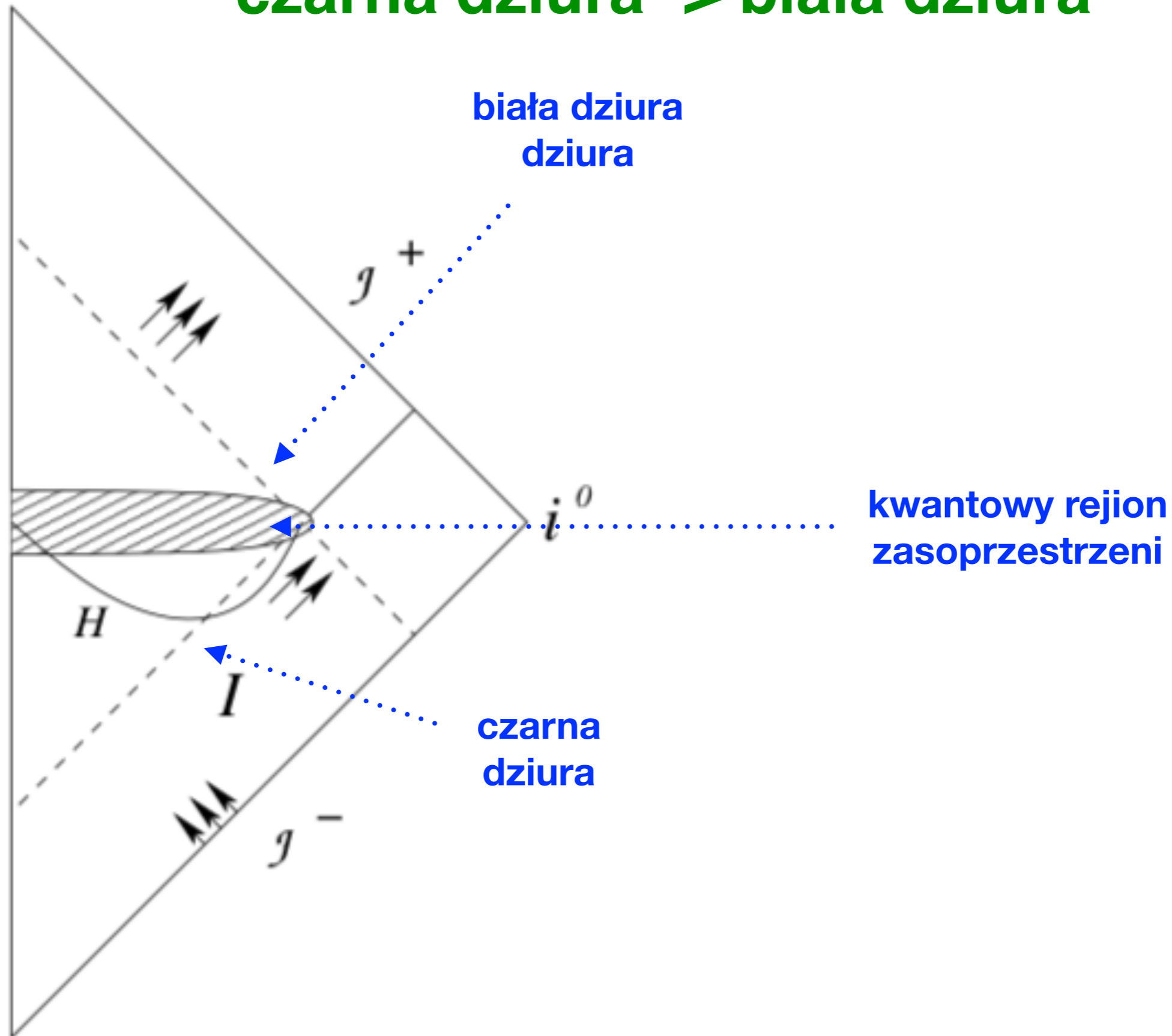
Robert M. Wald

The University of Chicago Press
Chicago and London

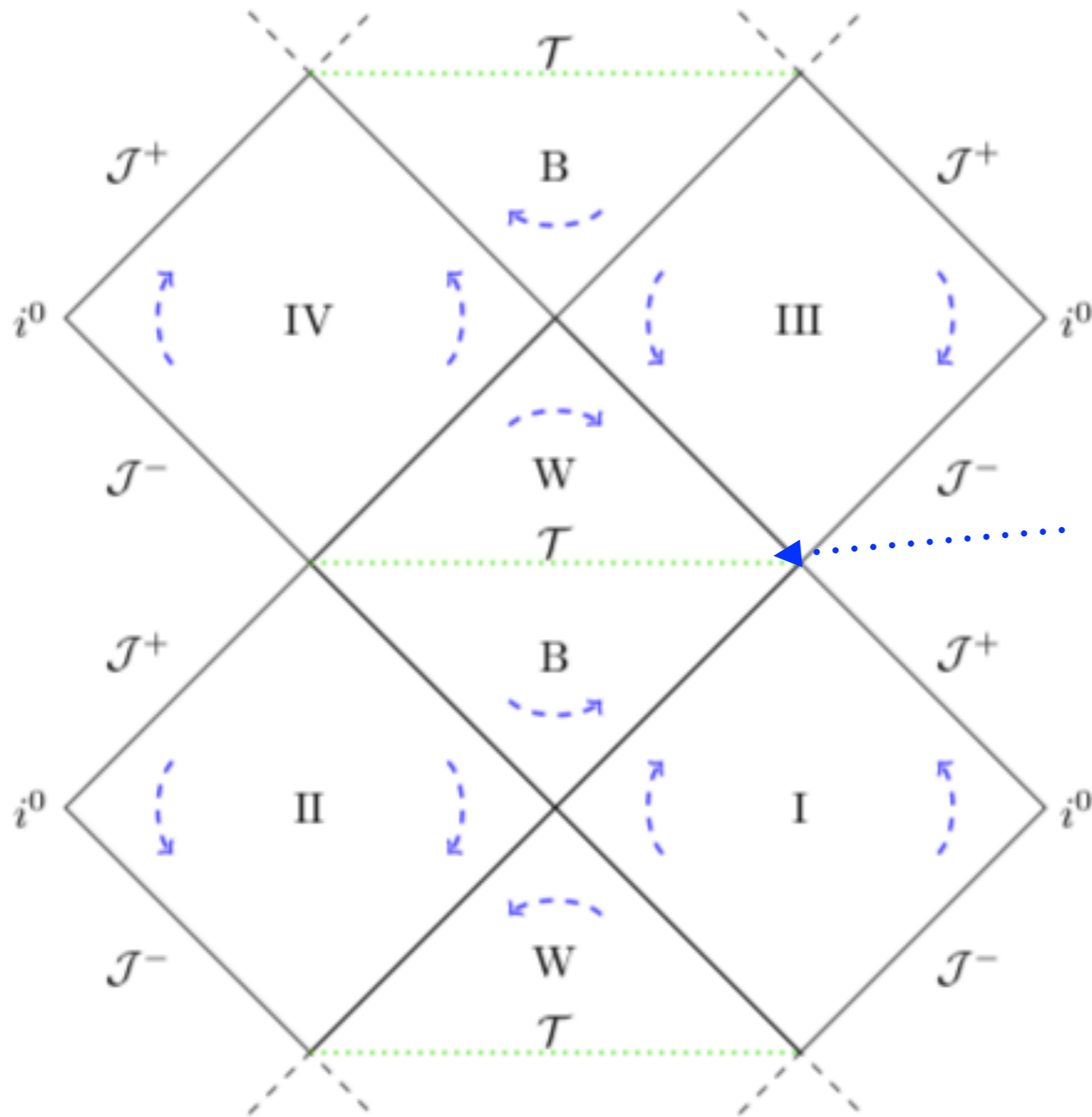


Efekty kwantowej grawitacji?

Hipoteza kwantowego tunelowania: czarna dziura -> biała dziura



Hipoteza kwantowego wygładzenia osobliwości w diagramie Kruskala metryki Schwarzschilda



wygładzona klasyczna wyrwa

Kwantowy model Oppenheimera-Snydera

nowy świat generowany przez
ekspandującą materię

$$\rho^q = \frac{3\alpha GM^2}{8\pi r^6}.$$

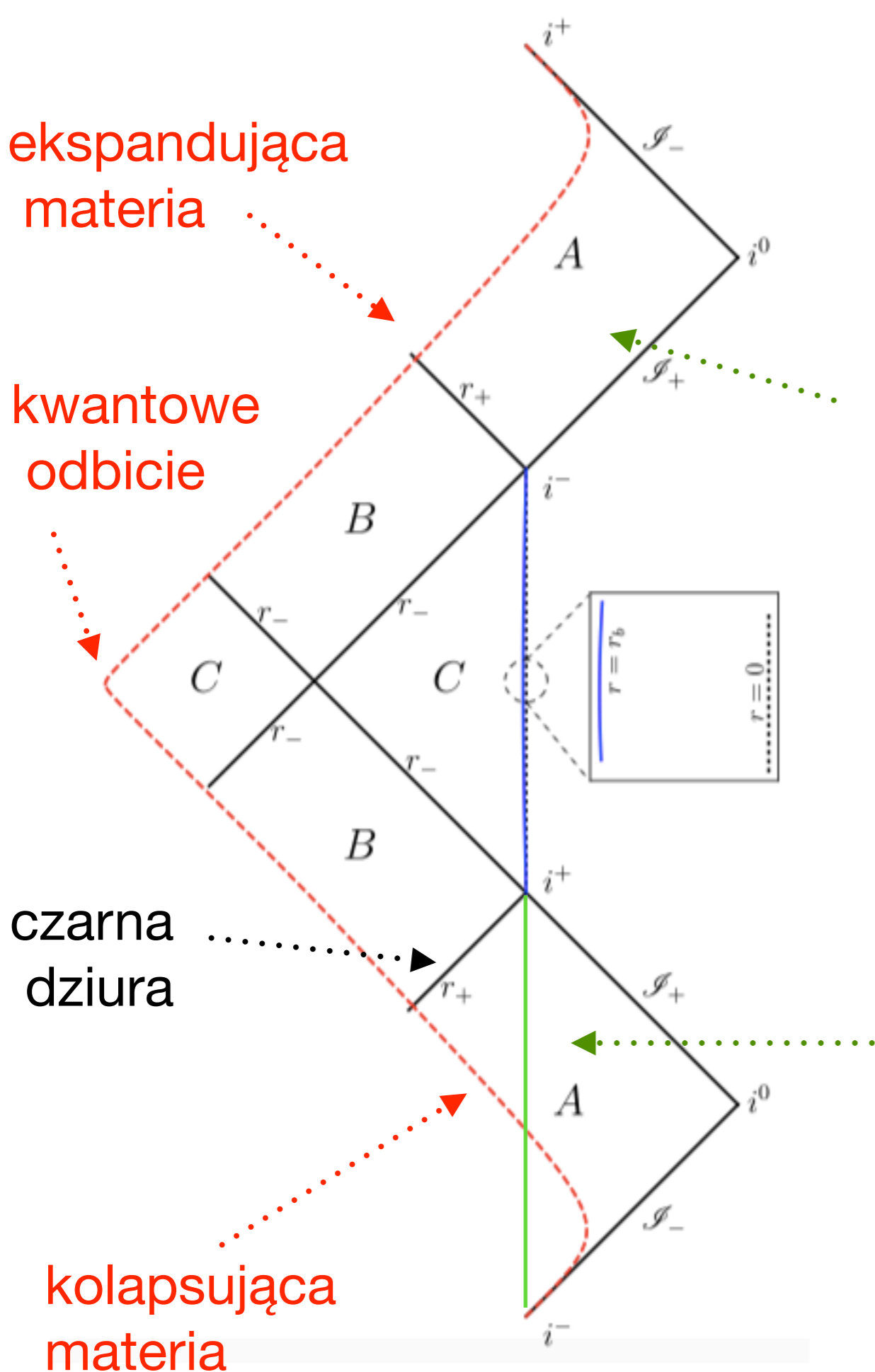
statyczny obserwaror,
który nigdy nie doświadczy
kwantowych efektów wewnątrz

ekspandująca
materia

kwantowe
odbicie

czarna
dziura

kolapsująca
materia



Podsumowanie

Omówiliśmy:

-
- historię odkrycia czarnych dziur

- własności czasoprzestrzeni na zewnątrz czarnych dziur
- własności czasoprzestrzeni wewnątrz czarnych dziur

Czy te inne wszechświaty wewnątrz czarnych mogą istnieć?

W zasadzie tak. Są dwa powody:

- a) teoria je dopuszcza - co jest dozwolone, nie jest zabronione
- b) są one w pewnym sensie konieczne przy pewnych założeniach, z których głównym jest to, że czarna dziura jest pierwotna; przy braku zapadającej się materii, są konieczne dla kompletności czasoprzestrzeni.

Dziękuję za uwagę

Podsumowanie

Omówiliśmy:

- geometrie czasoprzestrzeni
- teoretyczne zjawisko czarnej dziury
- opinie a następnie dowody istnienia czarnych dziur
- perypetie fikcyjnej astronautki:
 - oglądającej czarną dziurę z zewnątrz
 - wpadającej do czarnej dziury
 - zwiedzającej czarną dziurę w środku
- Hipotezy dotyczące kwantowych efektów wewnątrz czarnej dziury.

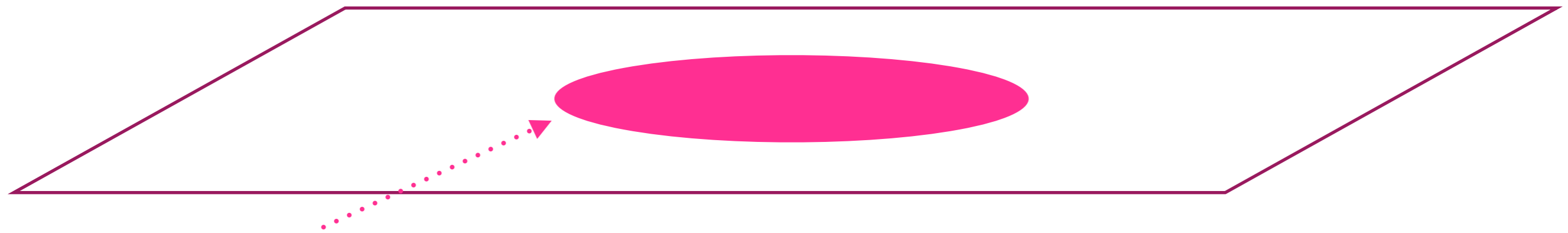
Wnioski:

- szereg niezwykłych własności, które dobrze rozumiemy
- szereg własności przewidywanych matematycznie, ale o nieznanym statusie fizycznym: wyrwy w czasoprzestrzeni, nowe światy
- hipotezy o kwantowych obszarach czasoprzestrzeni wewnątrz czarnej dziury

Dziękuję za uwagę

Model Oppenheimera - Snydera

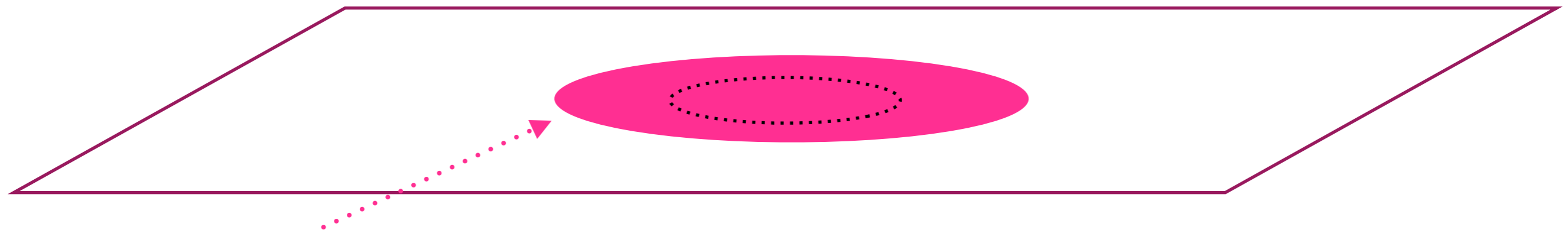
Sferycznie symetryczny model kolapsu gwiazdy kończący się powstaniem czarnej dziury.



zapadająca się gwiazda

Model Oppenheimera - Snydera

Sferycznie symetryczny model kolapsu gwiazdy kończący się powstaniem czarnej dziury.



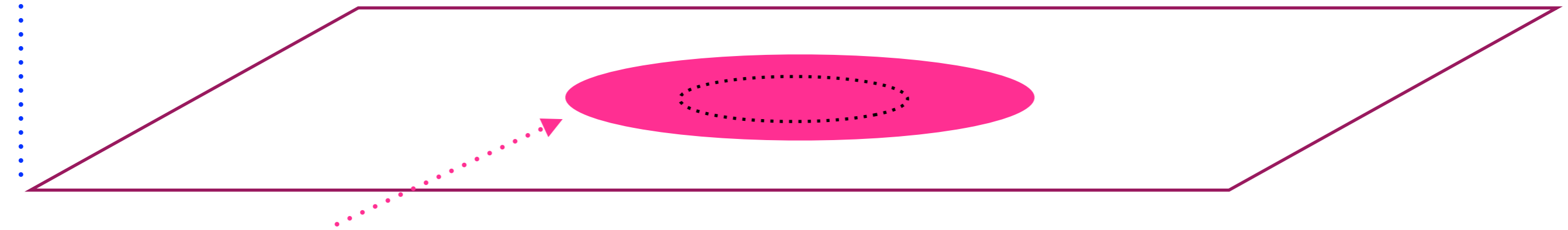
zapadająca się gwiazda

Model Oppenheimera - Snydera

czas

Sferycznie symetryczny model
kolapsu gwiazdy kończący się
powstaniem czarnej dziury.

zapadająca się gwiazda

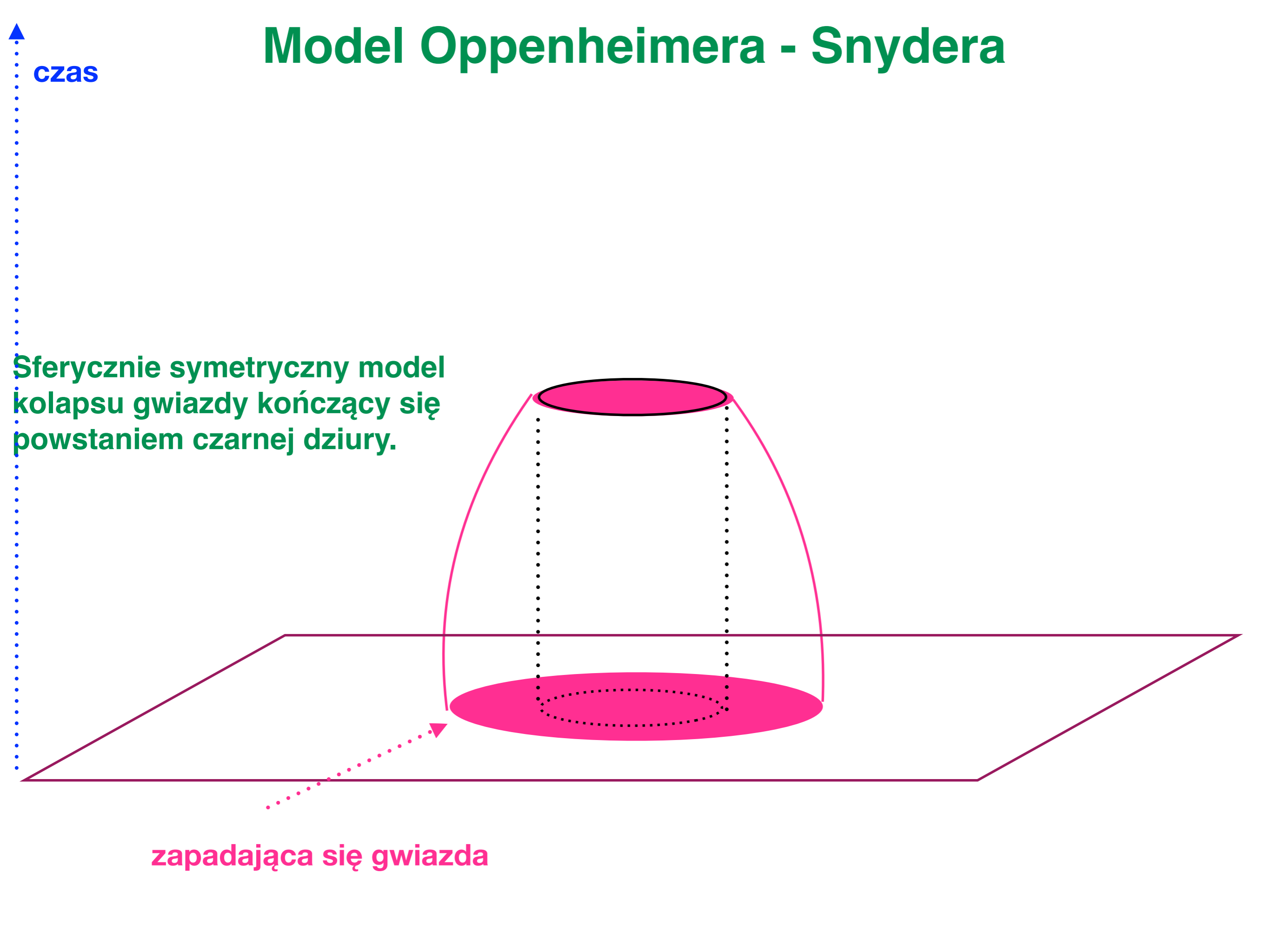


Model Oppenheimera - Snydera

czas

Sferycznie symetryczny model kolapsu gwiazdy kończący się powstaniem czarnej dziury.

zapadająca się gwiazda



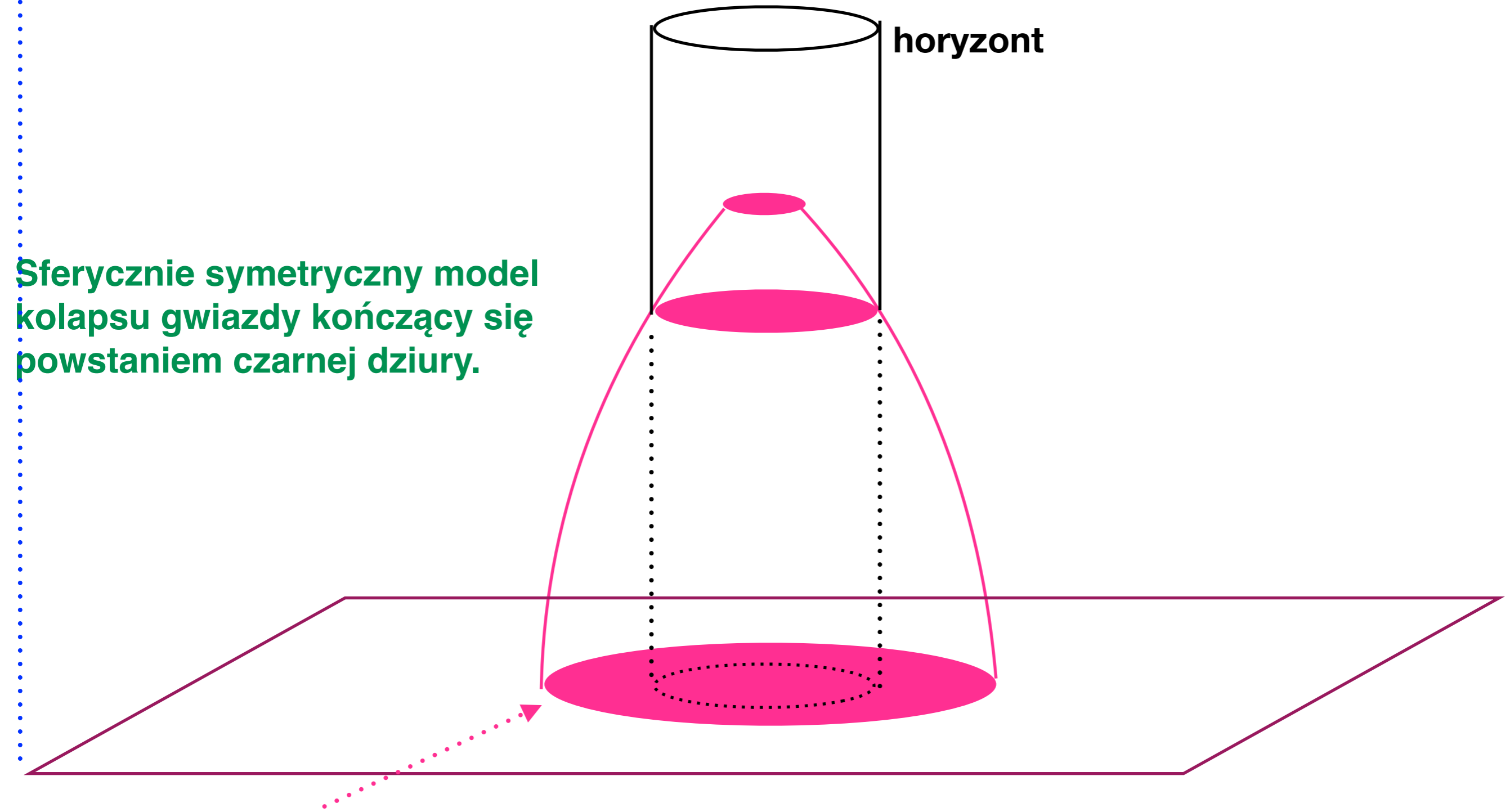
Model Oppenheimera - Snydera

czas

Sferycznie symetryczny model kolapsu gwiazdy kończący się powstaniem czarnej dziury.

horyzont

zapadająca się gwiazda



Model Oppenheimera - Snydera

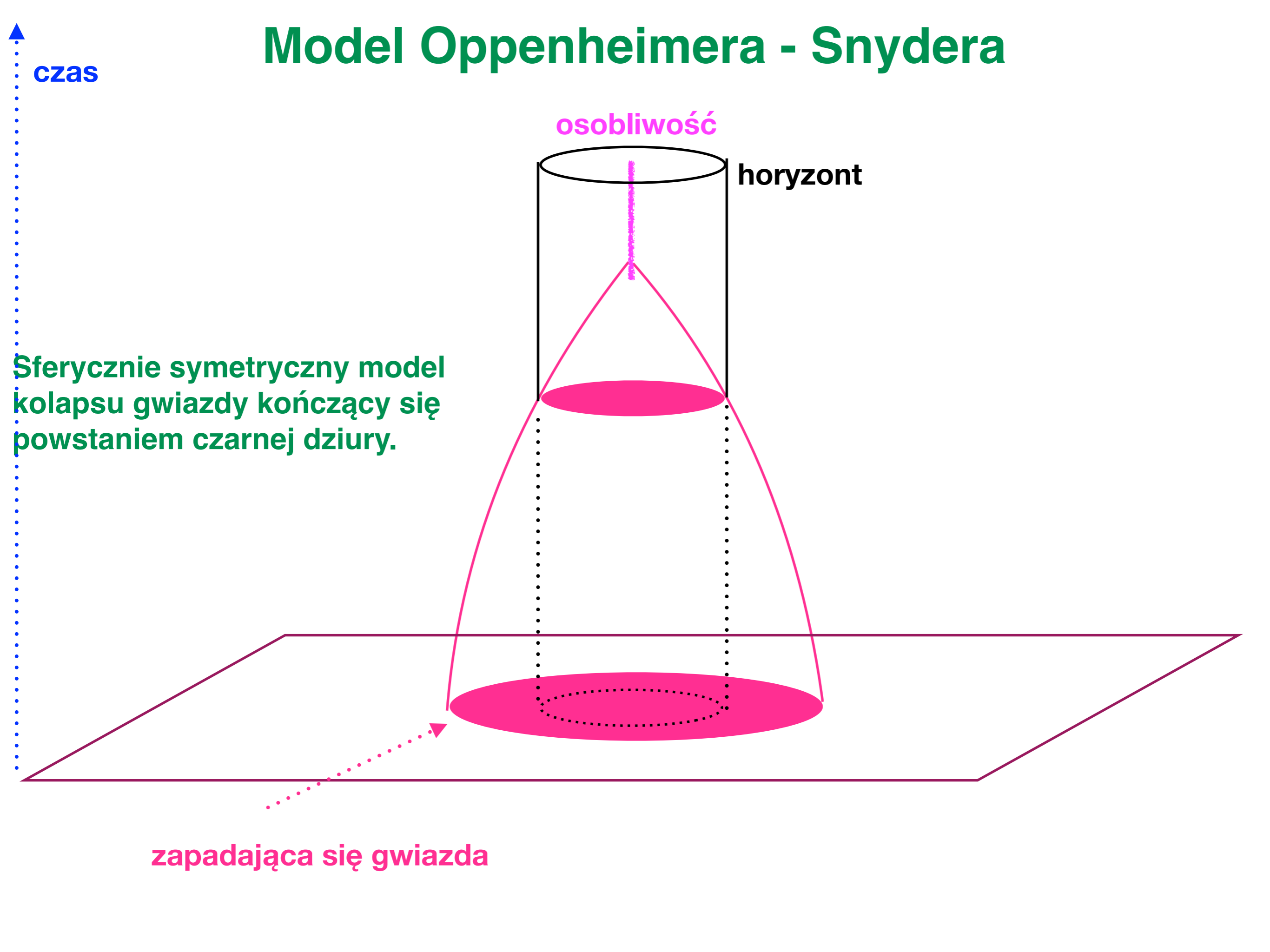
czas

osobliwość

horyzont

Sferycznie symetryczny model kolapsu gwiazdy kończący się powstaniem czarnej dziury.

zapadająca się gwiazda



Model Oppenheimera - Snydera

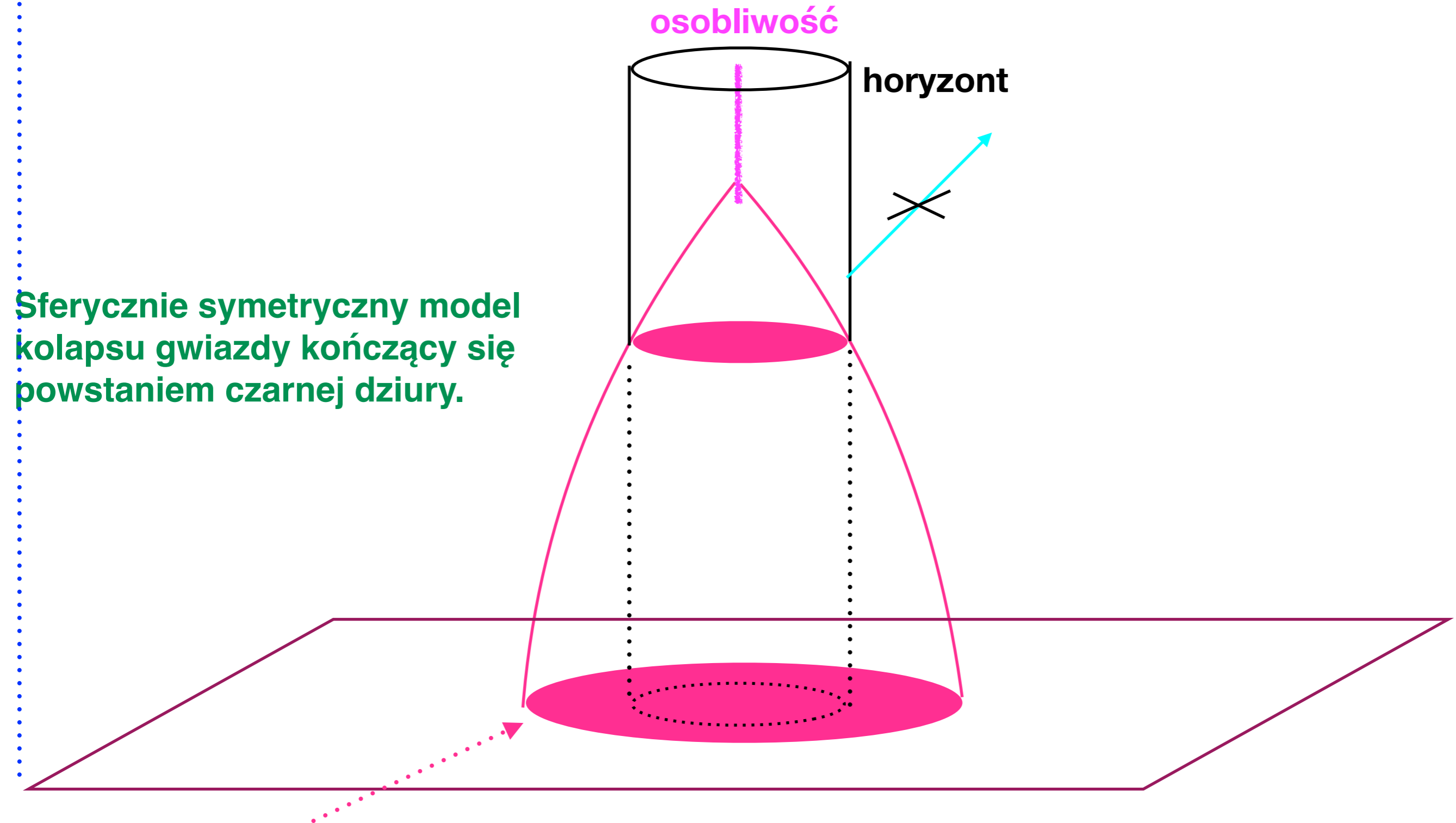
czas

osobliwość

horyzont

Sferycznie symetryczny model kolapsu gwiazdy kończący się powstaniem czarnej dziury.

zapadająca się gwiazda



Model Oppenheimera - Snydera

czas

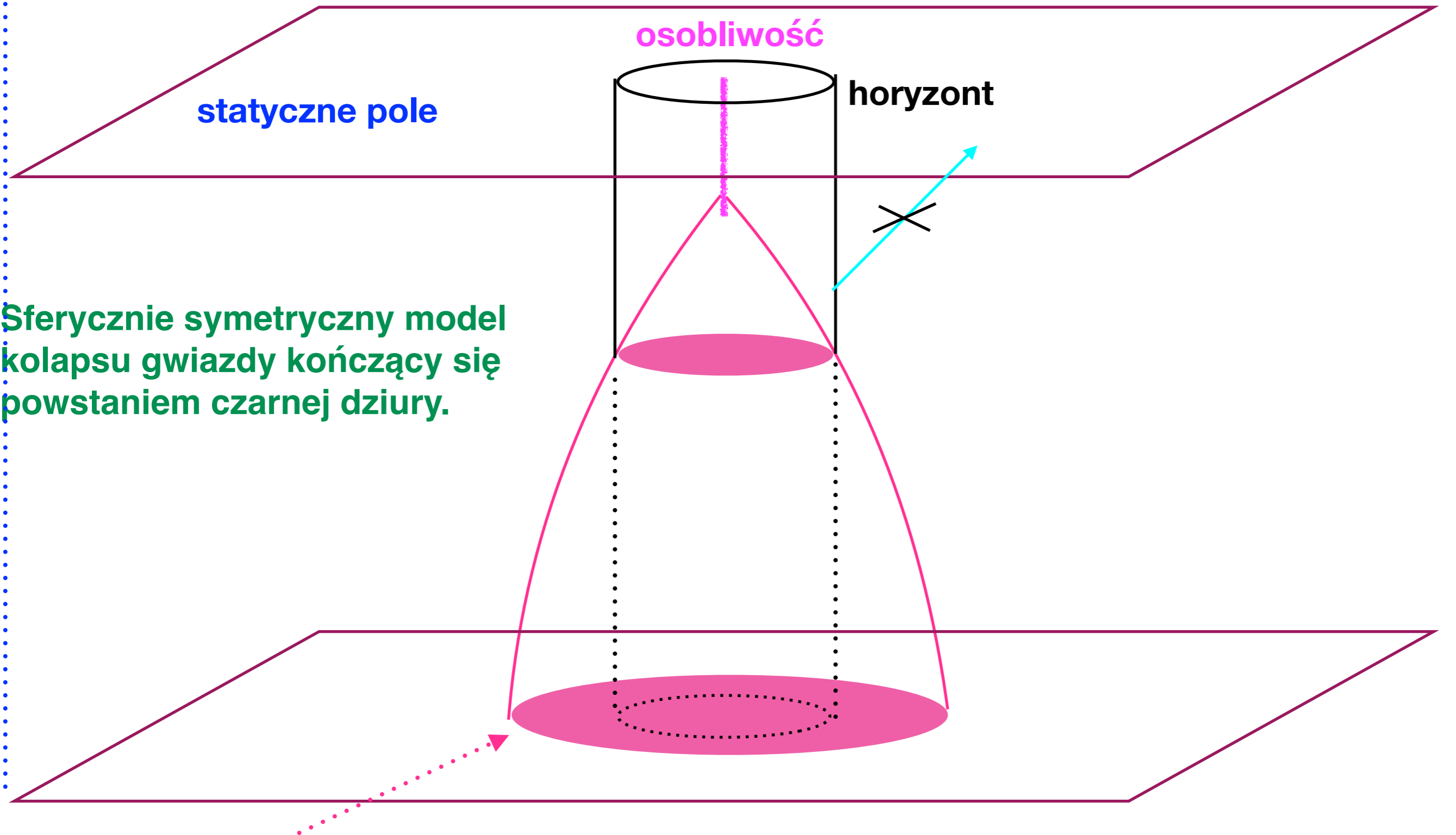
statyczne pole

osobliwość

horyzont

Sferycznie symetryczny model kolapsu gwiazdy kończący się powstaniem czarnej dziury.

zapadająca się gwiazda

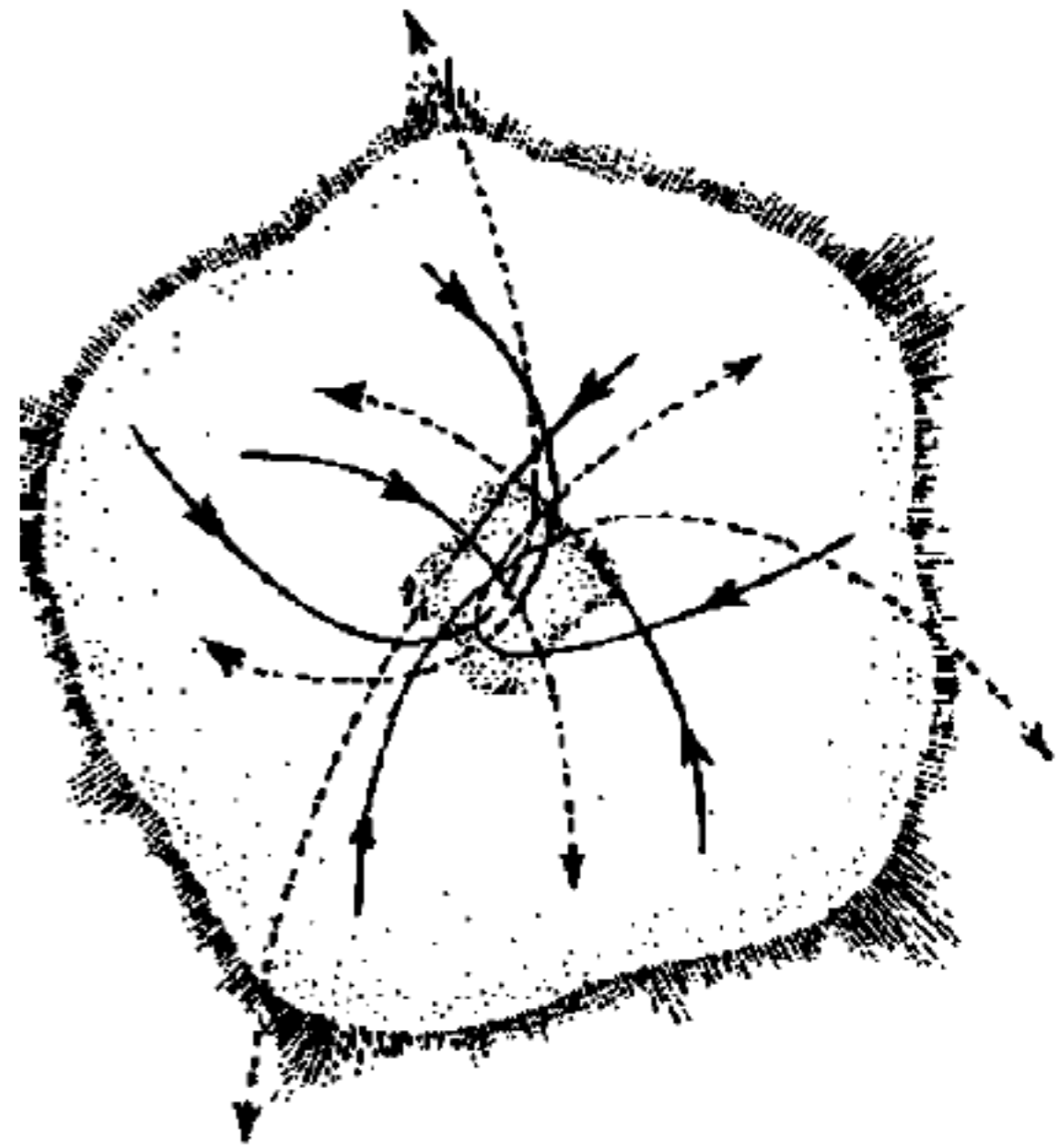


Model Oppenheimera - Snydera ściśle spełnia równania Einsteina, ale jego warunki początkowe są wyidealizowane. Czy więc wnioski są stabilne za względu na przypadkowe zaburzenie warunków początkowych?

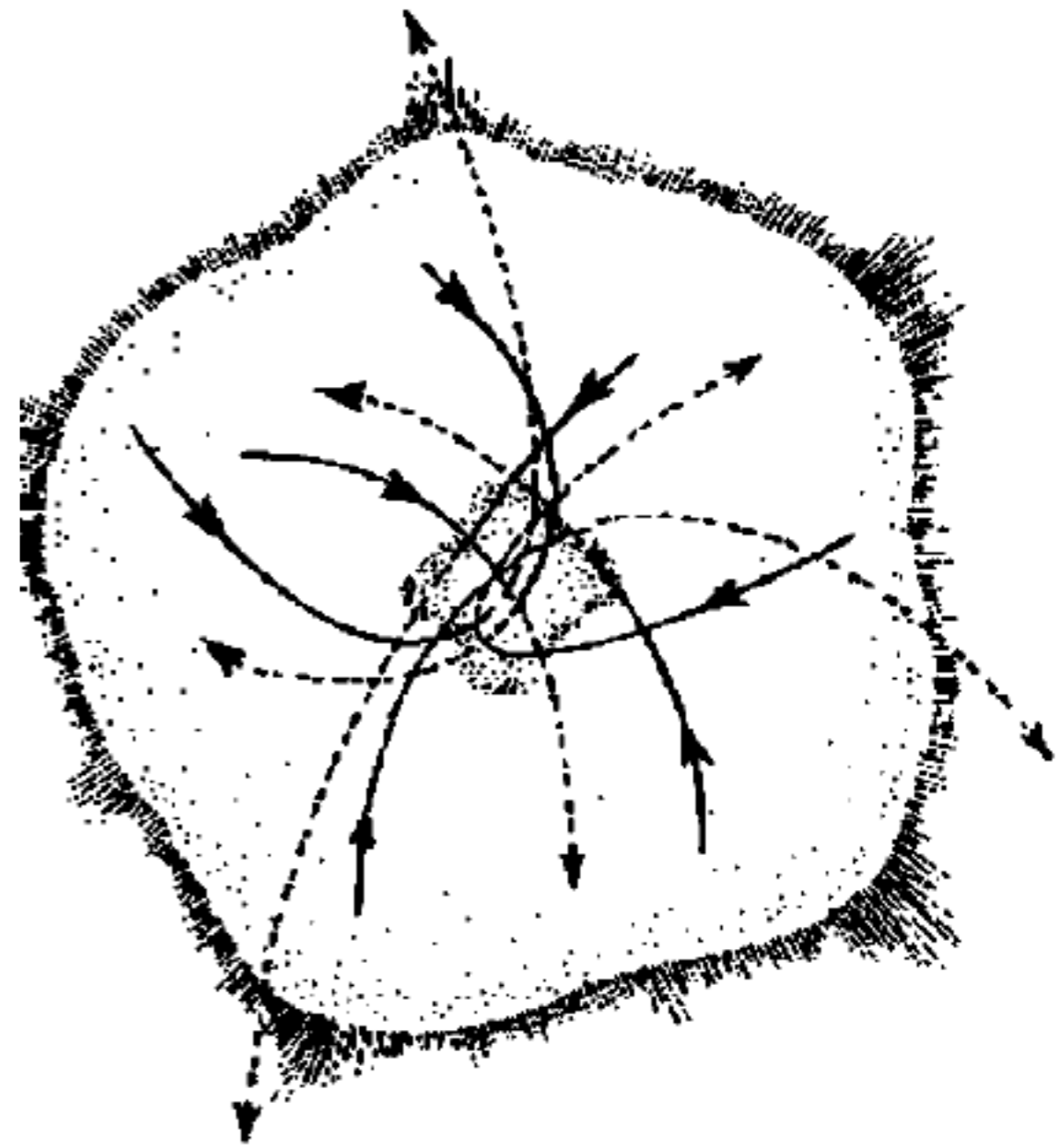
**Modele przekształcania implozji
gwiazdy w eksplozję:**

**jeśli implodująca gwiazda jest
lekko zdeformowana, jej atomy
implodują w nieco innych
punktach, mijają się i odlatują**

**Modele przekształcania implozji gwiazdy w eksplozję:
jeśli implodująca gwiazda jest lekko zdeformowana, jej atomy implodują w nieco innych punktach, mijają się i odlatują**

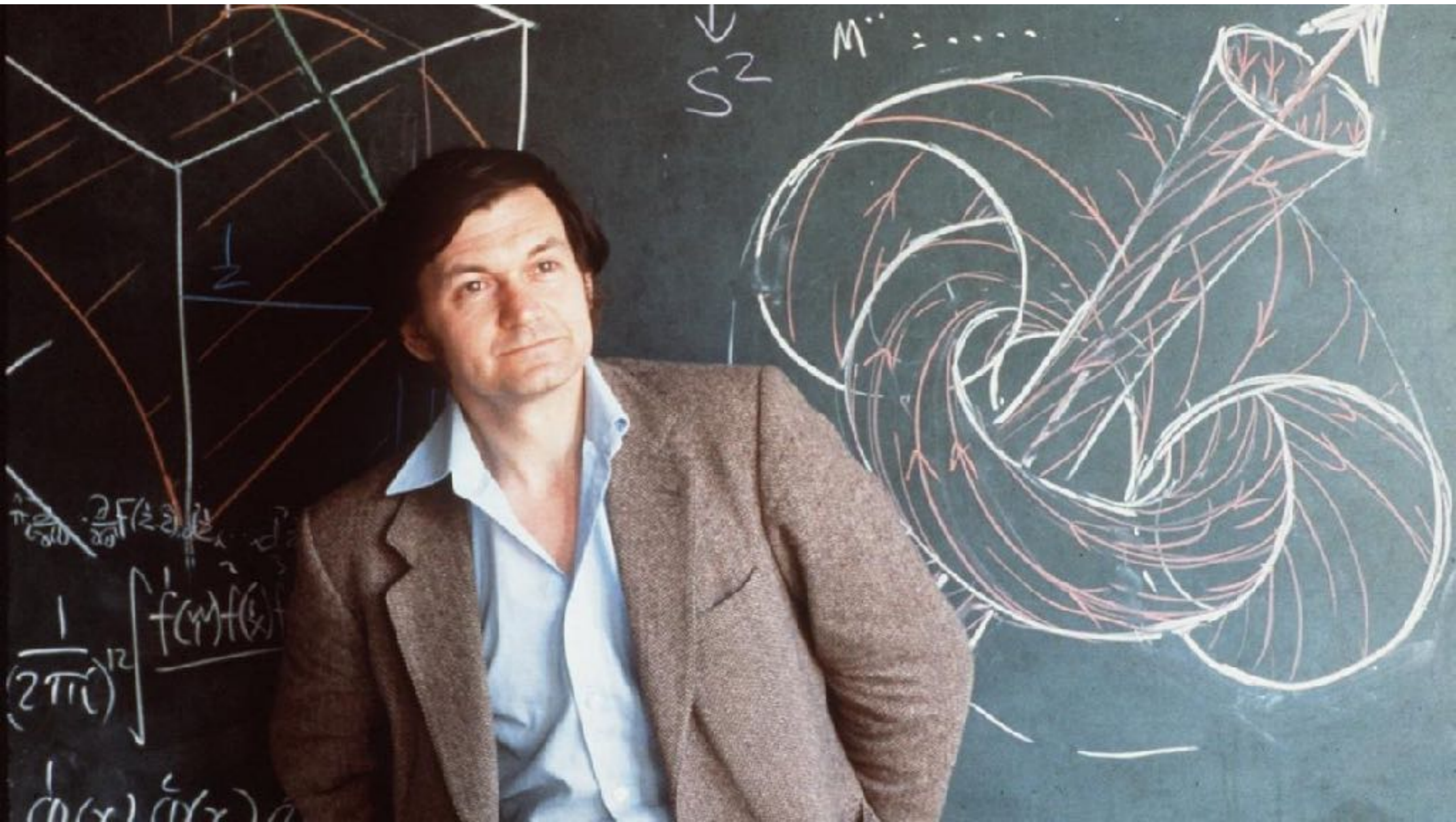


Modele przekształcania implozji gwiazdy w eksplozję: jeśli implodująca gwiazda jest lekko zdeformowana, jej atomy implodują w nieco innych punktach, mijają się i odlatują



Badania Khalatnikova-Lifshitza ...

Rewolucja Penrose'a



Roger Penrose

GRAVITATIONAL COLLAPSE AND SPACE-TIME SINGULARITIES

Roger Penrose

Department of Mathematics, Birkbeck College, London, England

(Received 18 December 1964)

The discovery of the quasistellar radio sources has stimulated renewed interest in the question of gravitational collapse. It has been suggested

measured by local comoving observers, the body passes within its Schwarzschild radius $r = 2m$. (The densities at which this happens

Penrose zrozumiał geometryczny mechanizm powstawania czarnej dziury w modelu sferycznie symetrycznym i udowodnił, że zdeformowane warunków początkowych nie zmienia wniosków o powstaniu czarnej dziury.

Penrose zrozumiał geometryczny mechanizm powstawania czarnej dziury w modelu sferycznie symetrycznym i udowodnił, że zdeformowane warunki początkowych nie ma wpływu na rezultat.

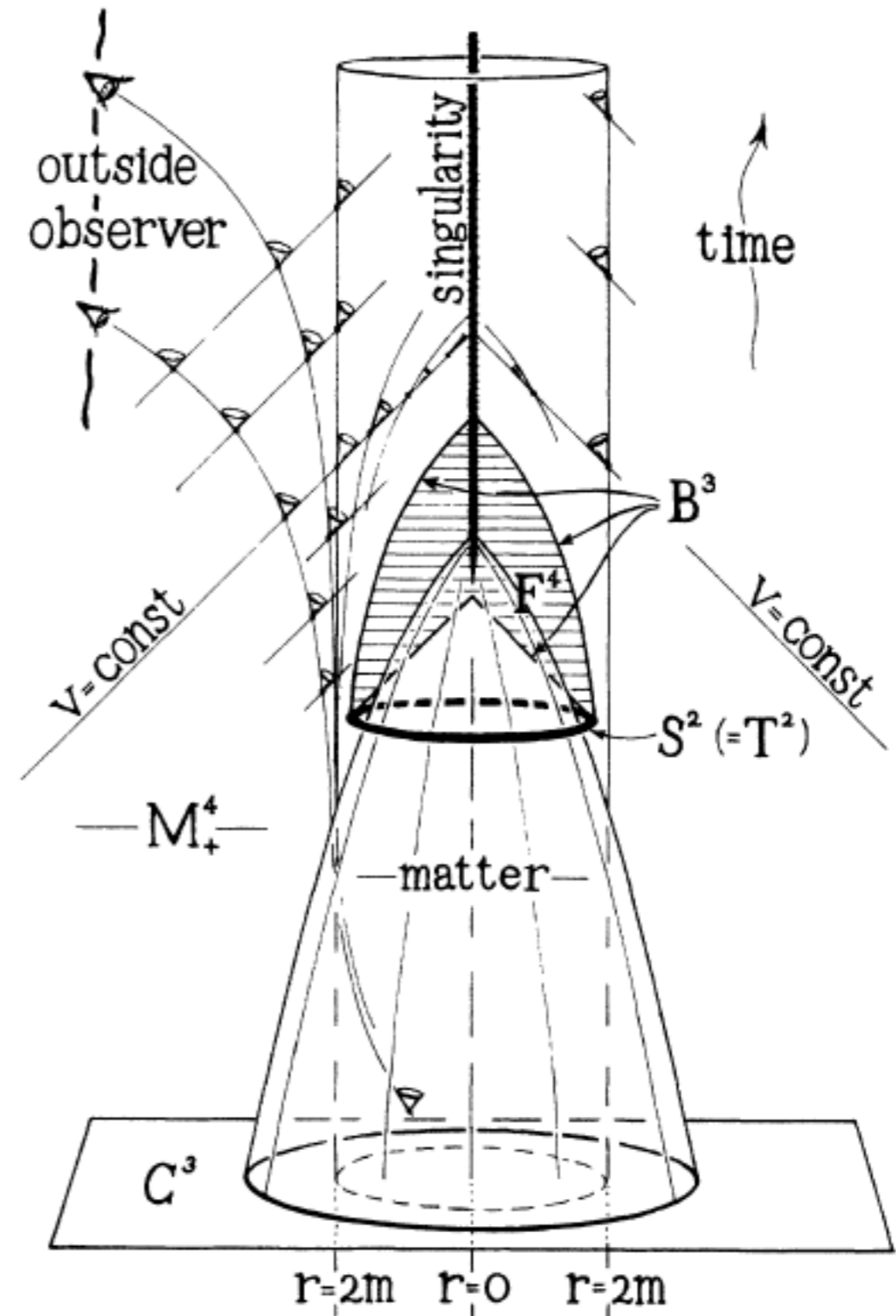


FIG. 1. Spherically symmetrical collapse (one space dimension suppressed). The diagram essentially also serves for the discussion of the asymmetrical case.

Proc. Roy. Soc. Lond. A. **314**, 529–548 (1970)

Printed in Great Britain

The singularities of gravitational collapse and cosmology

BY S. W. HAWKING

Institute of Theoretical Astronomy, University of Cambridge

AND R. PENROSE

Department of Mathematics, Birkbeck College, London

(Communicated by H. Bondi, F.R.S.—Received 30 April 1969)

A new theorem on space-time singularities is presented which largely incorporates and generalizes the previously known results. The theorem implies that space-time singularities are to be expected if *either* the universe is spatially closed *or* there is an ‘object’ undergoing relativistic gravitational collapse (existence of a trapped surface) *or* there is a point p whose



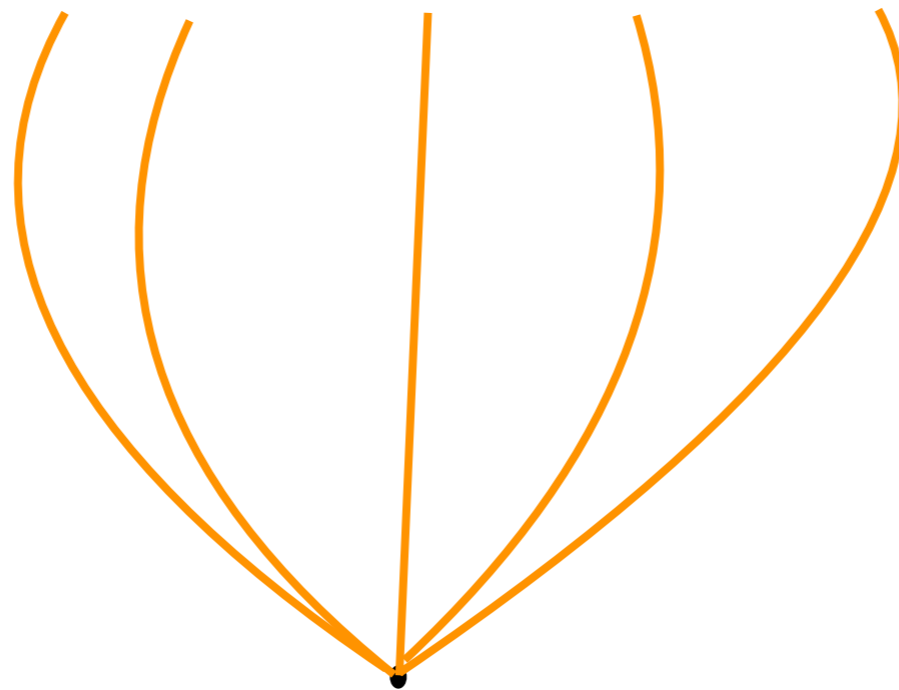
Steven Hawking

THEOREM. *No space-time M can satisfy all of the following three requirements together:*

- (3.1) *M contains no closed timelike curves,*
- (3.2) *every inextendible causal geodesic in M contains a pair of conjugate points,*
- (3.3) *there exists a future- (or past-) trapped set $S \subset M$.*

Podsumowanie

Penrose udowodnił, że formowanie się czarnej dziury w wyniku kolapsu grawitacyjnego jest prawdopodobne i nawet nieuniknione, jeśli kolaps przekroczy pewien graniczny punkt, którym jest nim kontrakcja (zamiast ekspansji) rozchodzących się promieni światła.



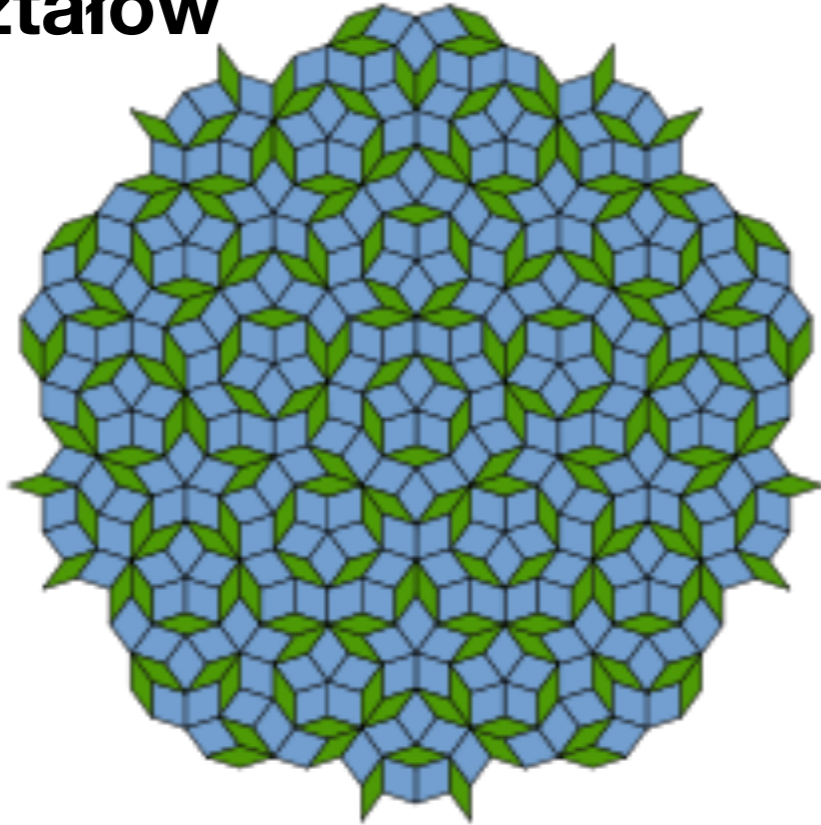
Udowodnił, że przyszłość takiego punktu można zawrzeć w skończonej powierzchni 3j wymiarowej.

Podsumowanie

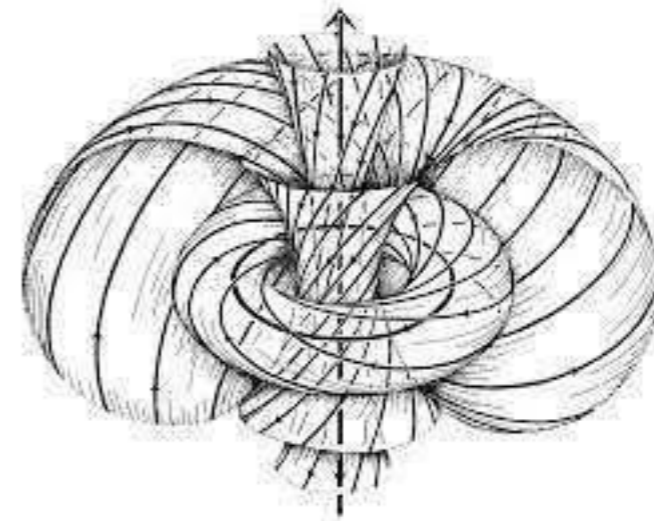
We wspólnej pracy Penrose'a z Hawkingiem oraz w pracach Hawkinga wynik ten został uogólniony do Wielkiego Wybuchu w kontekście kosmologicznym. Dowód konieczności formowania się horyzontu (nie)widzianego jako czarna dziura został zakończony przez Hawkinga.

Inne ważne pomysły Penrose'a

Aperiodyczna układanka i istnienie kwazi-kryształów

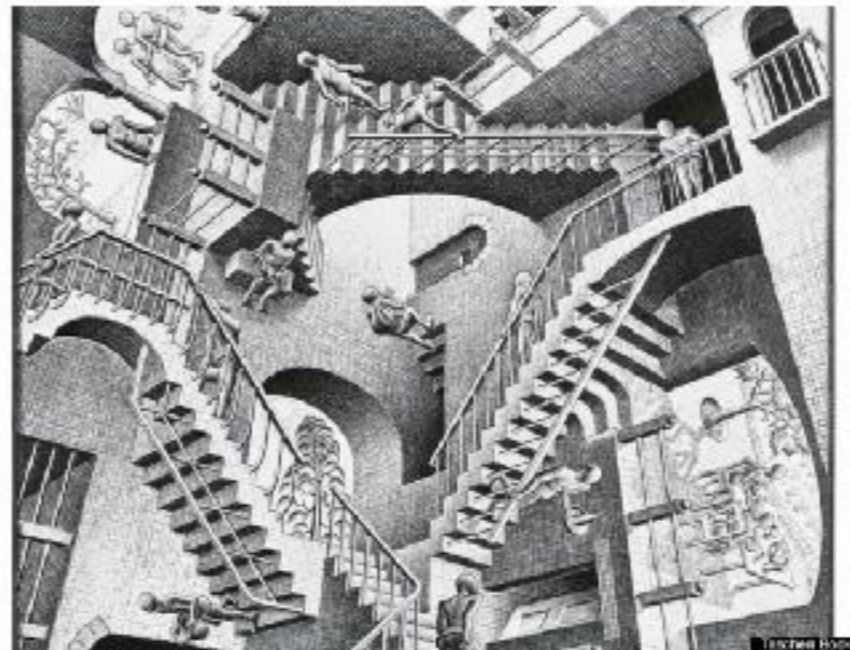
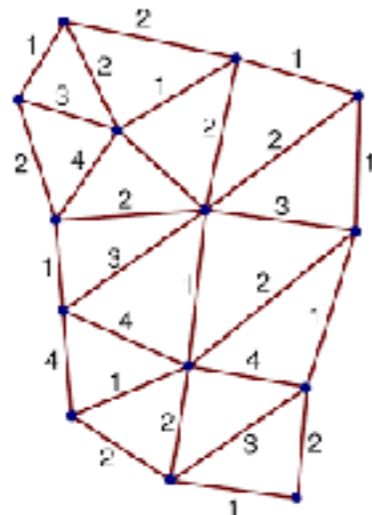


Teoria "twistorów"

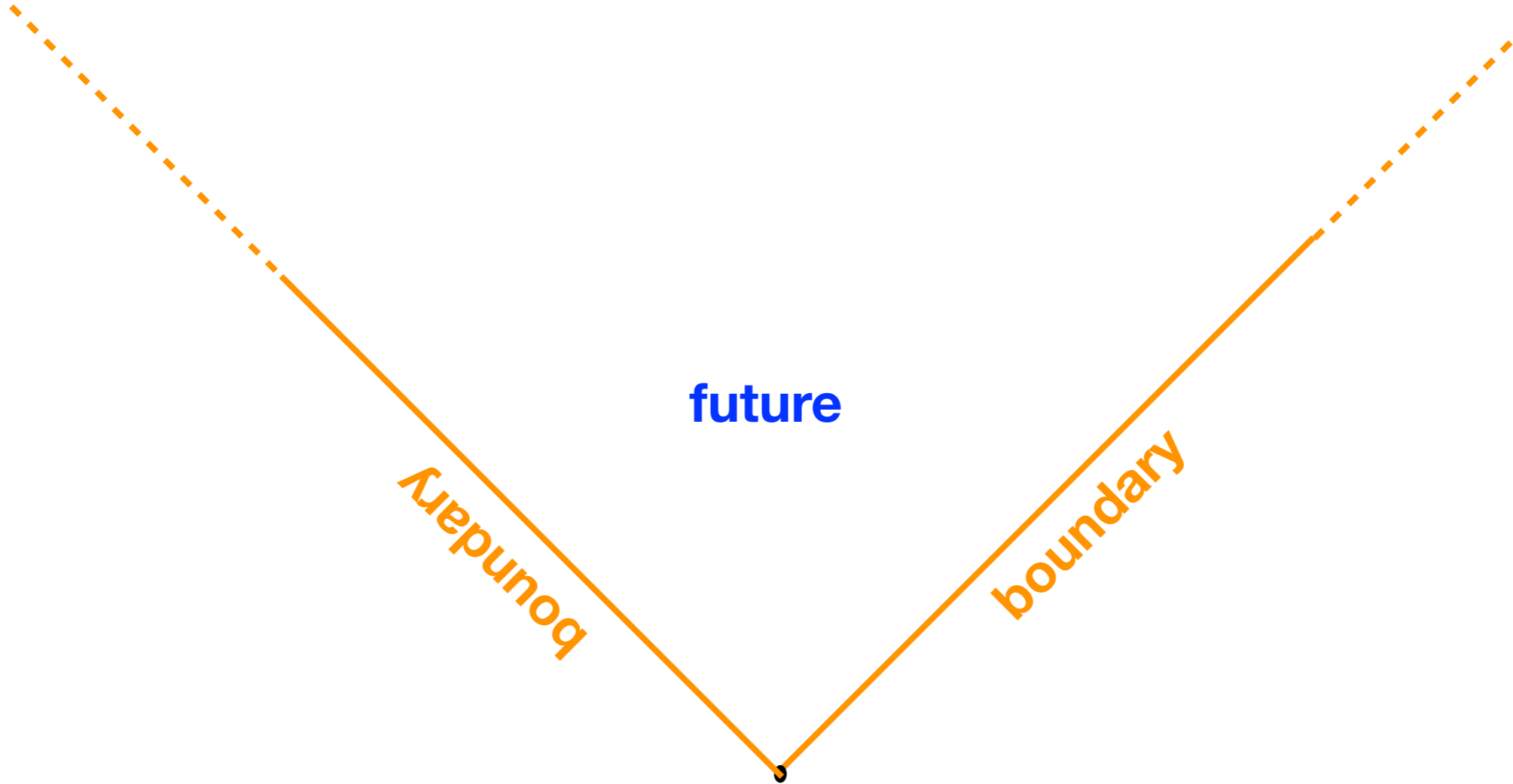


Nieemożliwe konstrukcje:

Sieci spinowe



Can the future have a compact, closed boundary?

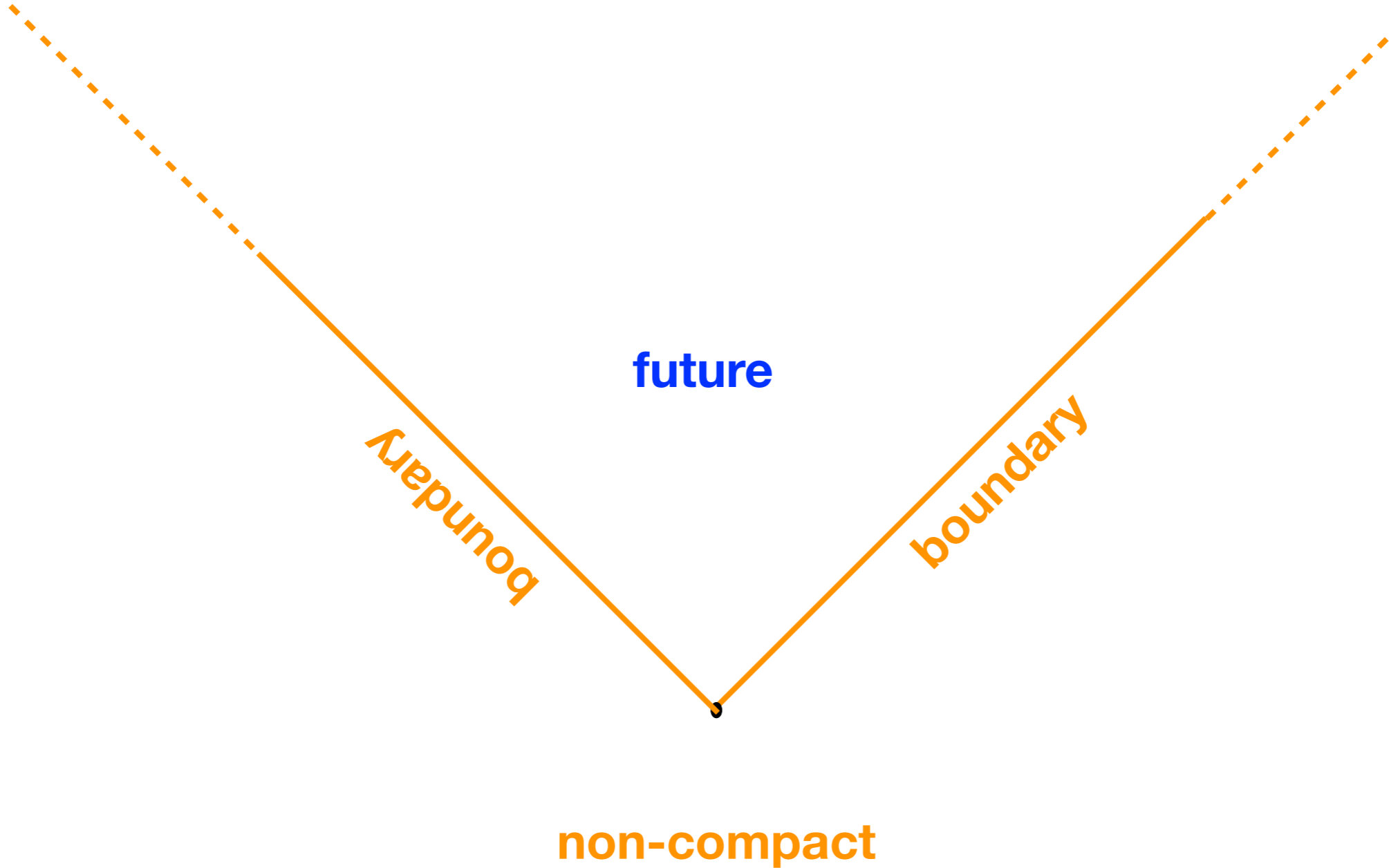


future

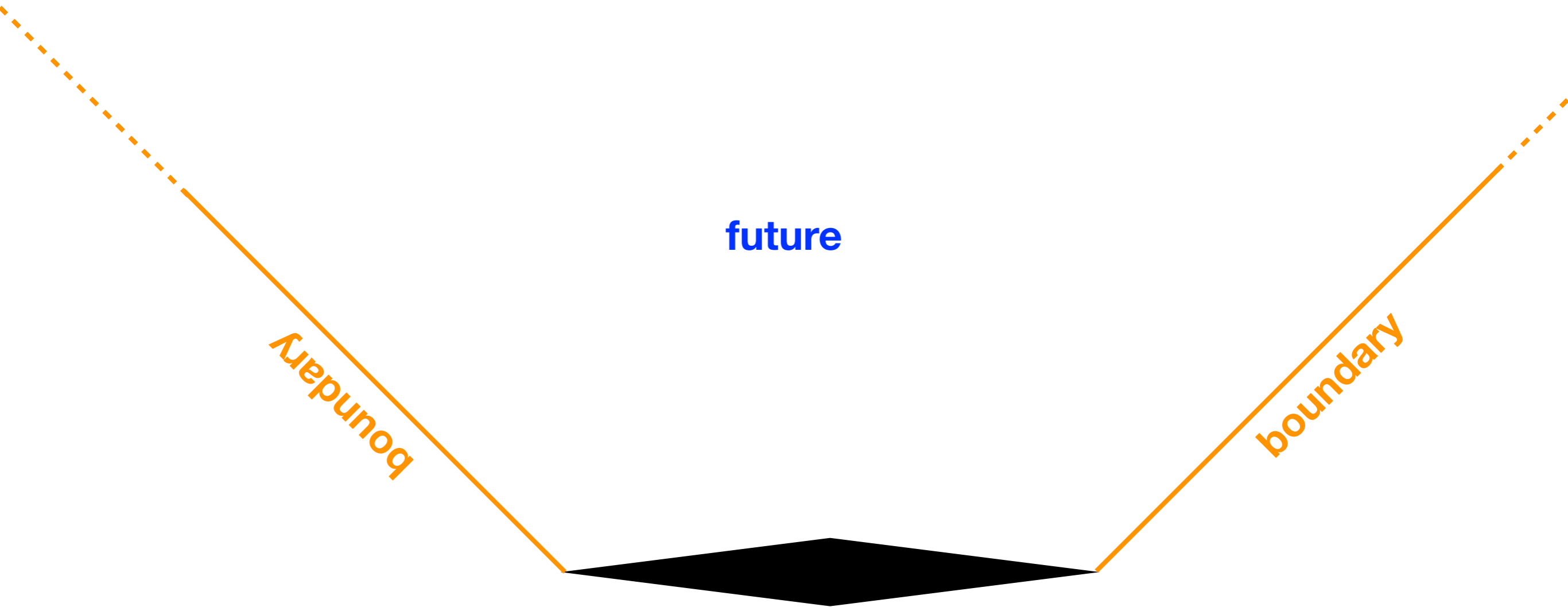
boundary

boundary

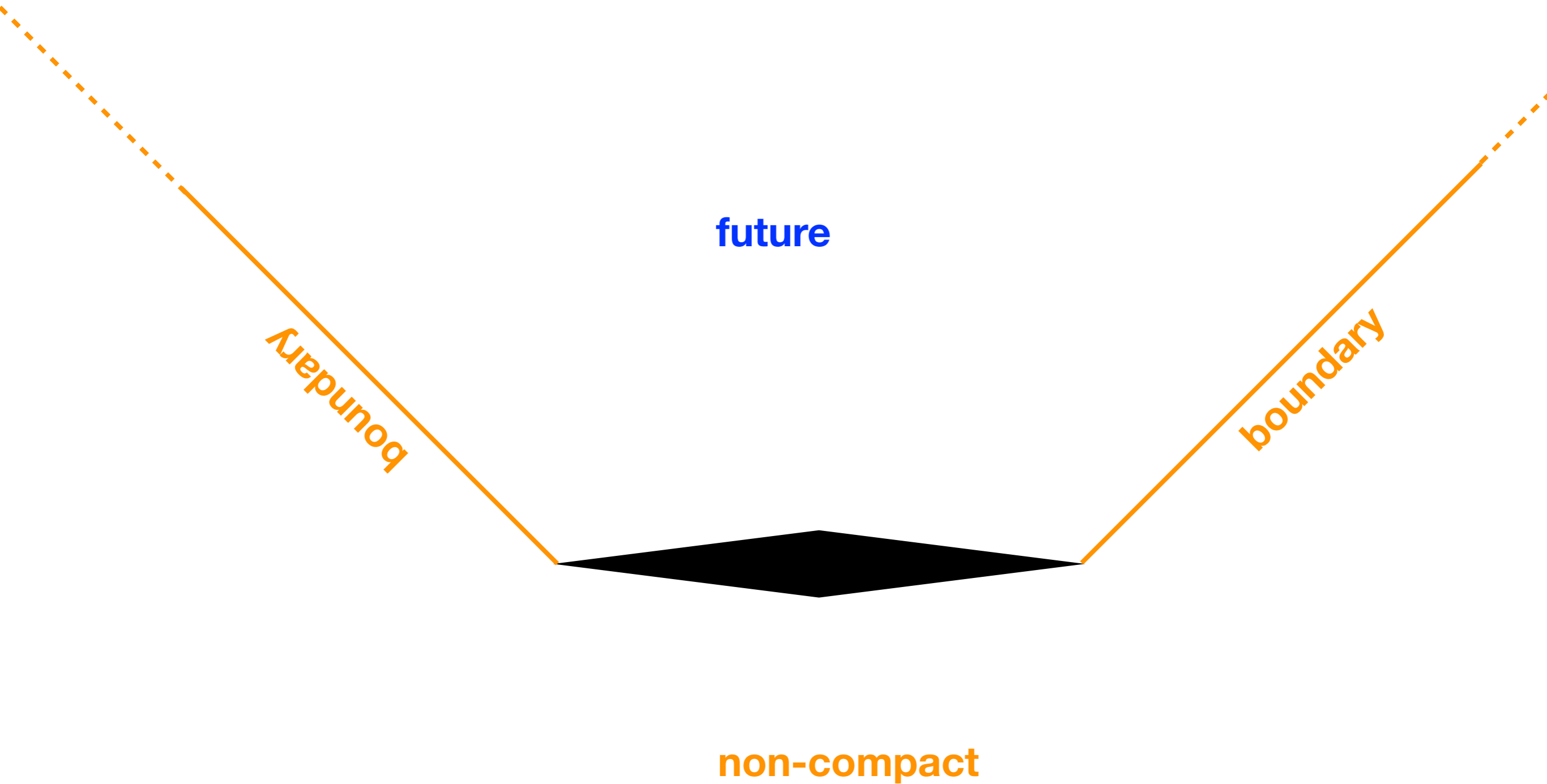
Can the future have a compact, closed boundary?



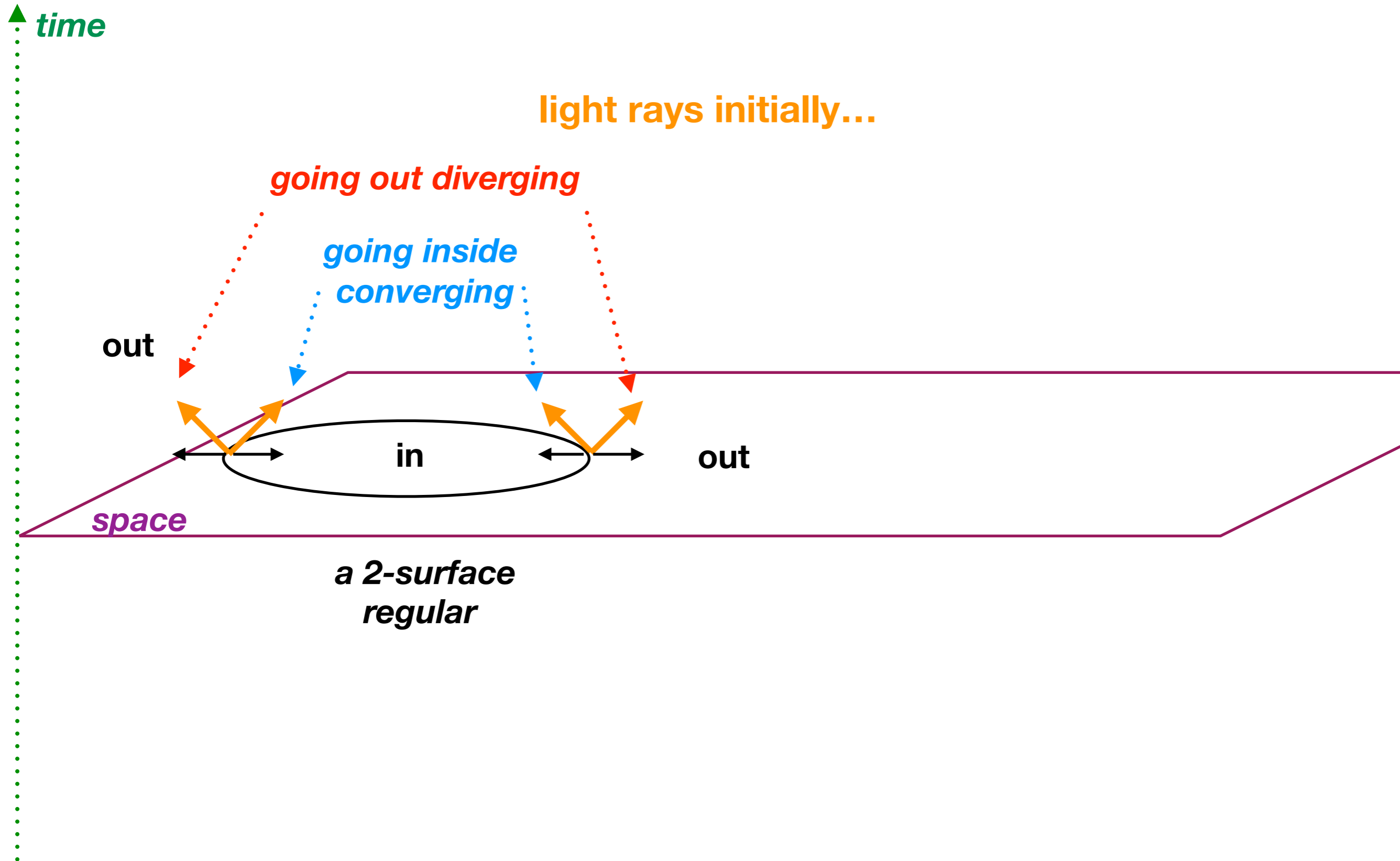
Can the future have a compact, closed boundary?



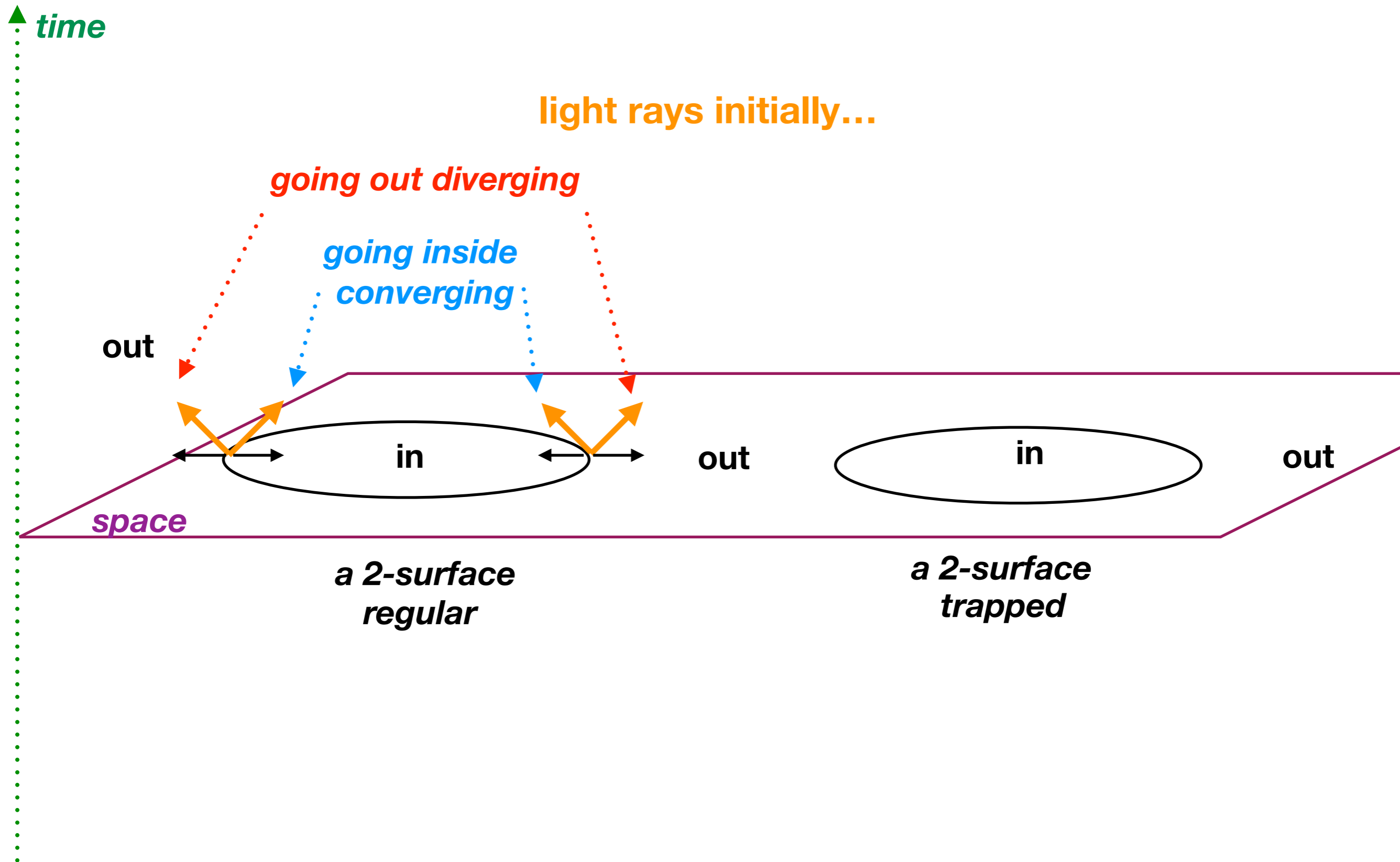
Can the future have a compact, closed boundary?



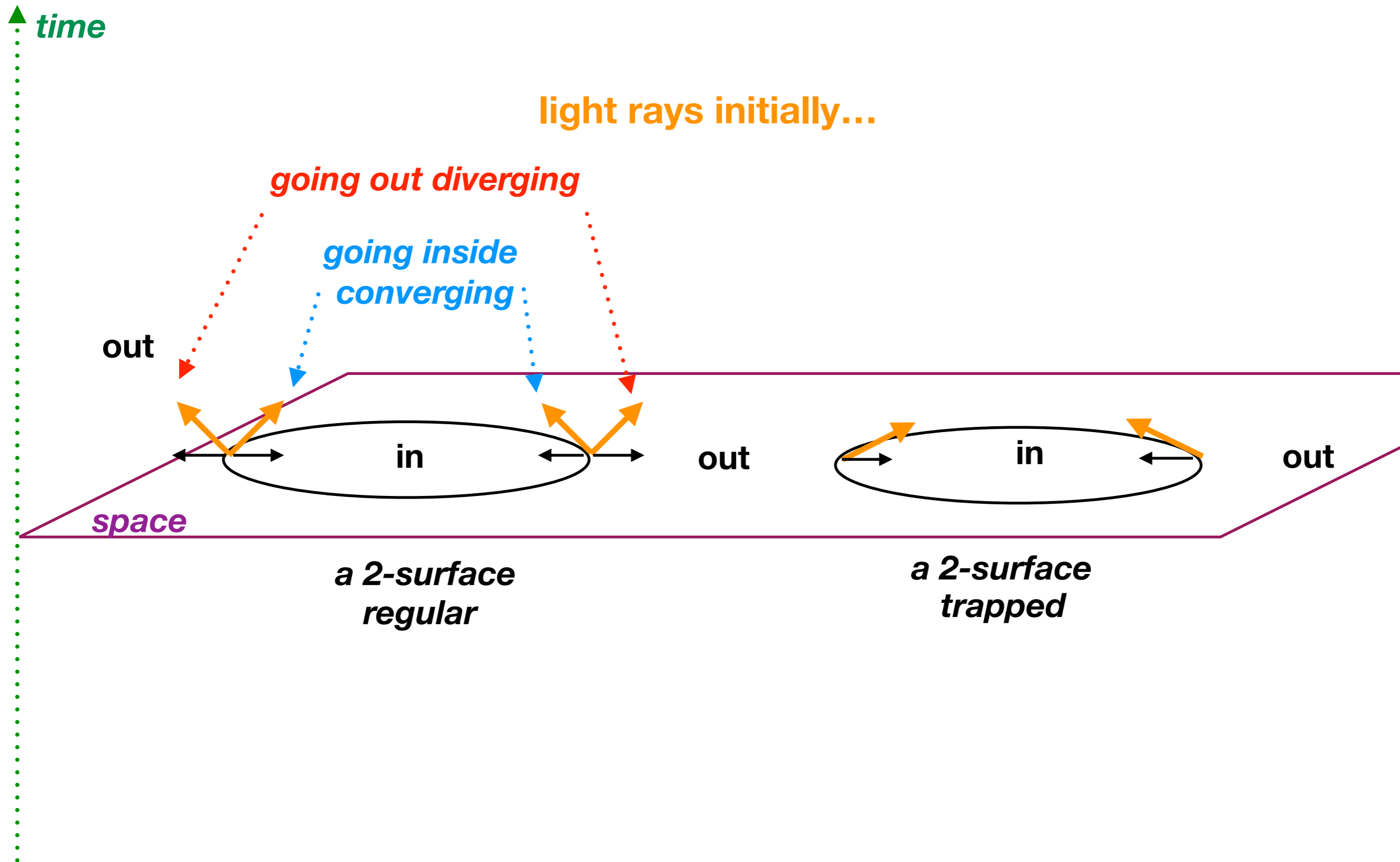
Penrose's trapped surface's



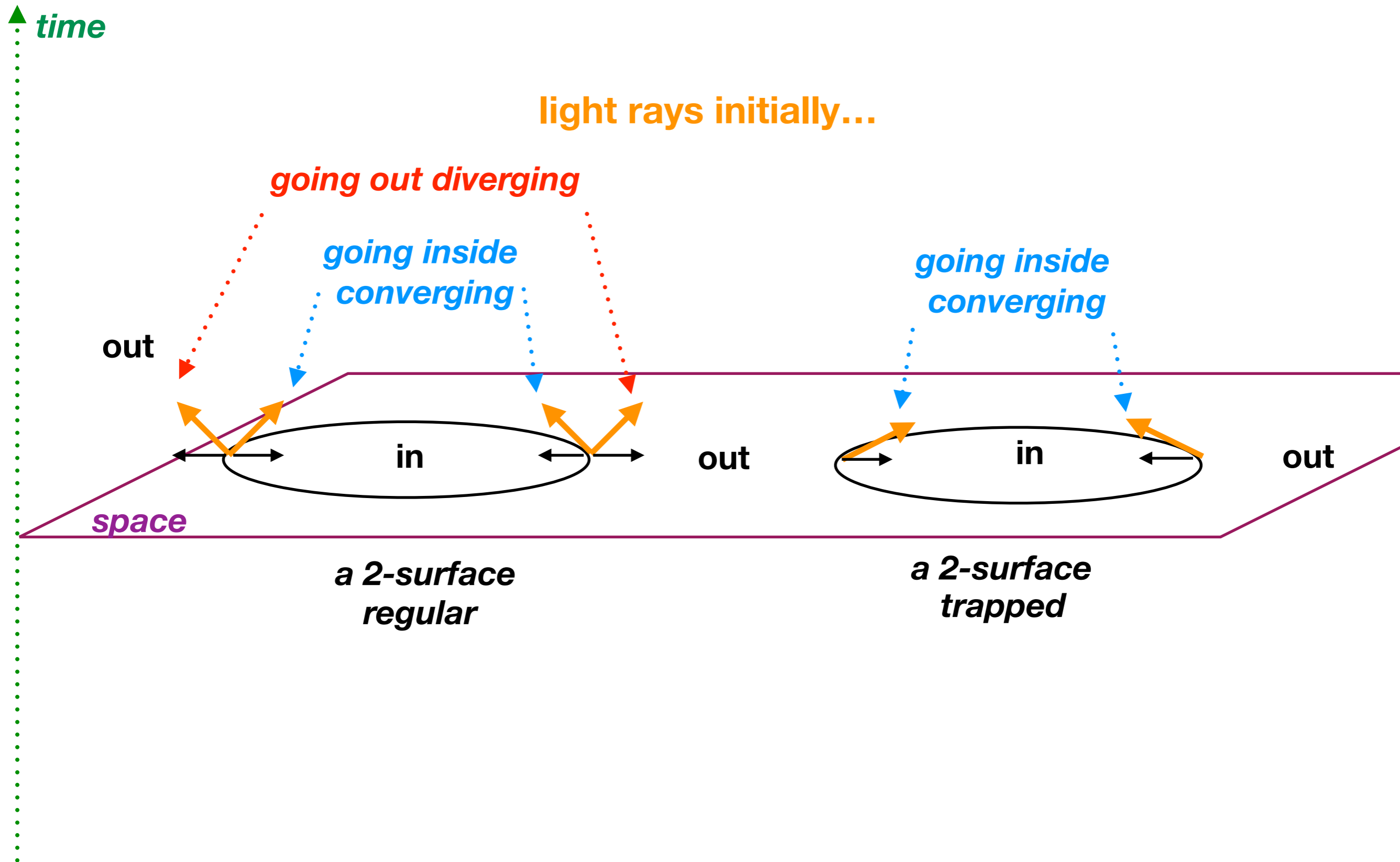
Penrose's trapped surface's



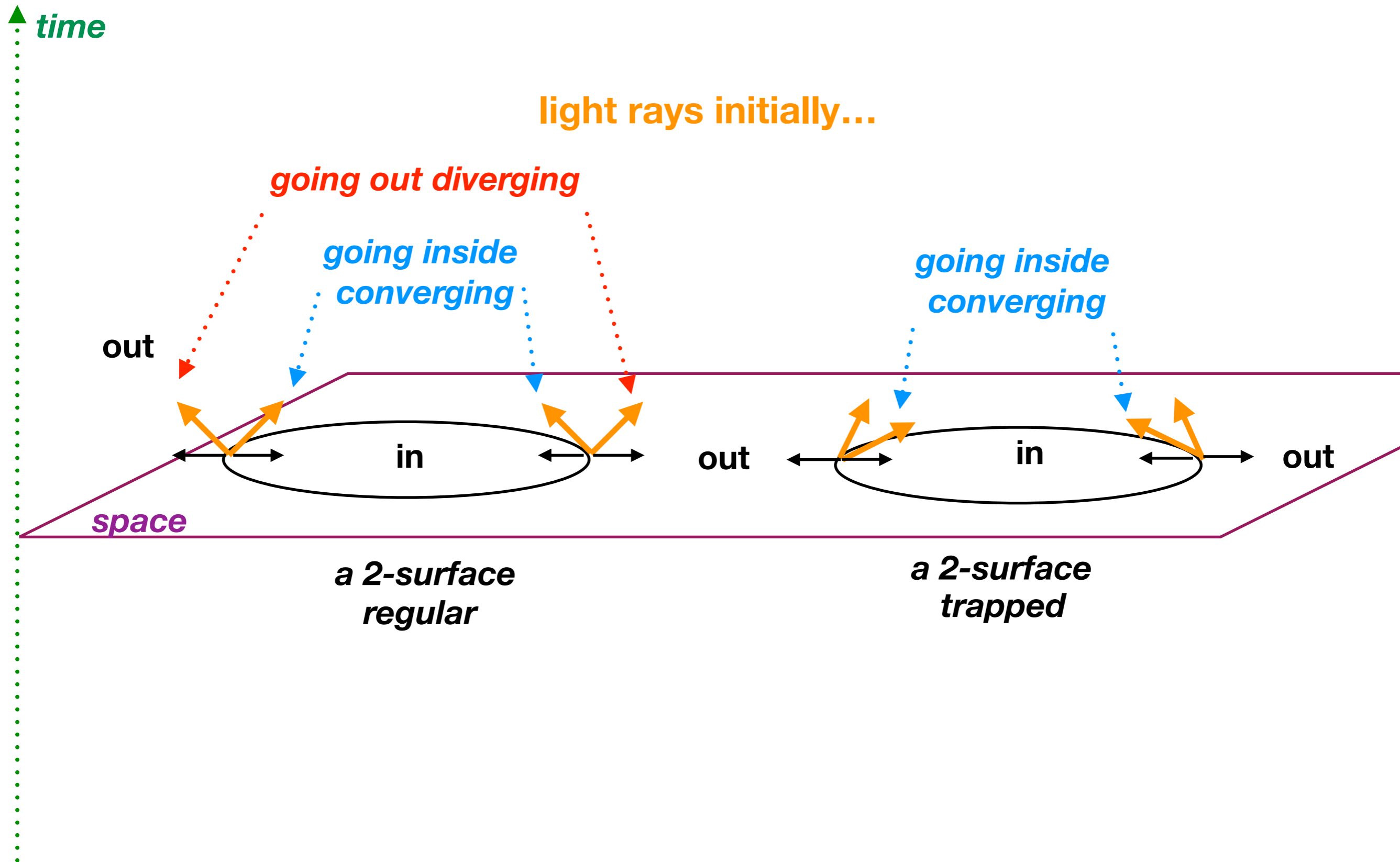
Penrose's trapped surfaces



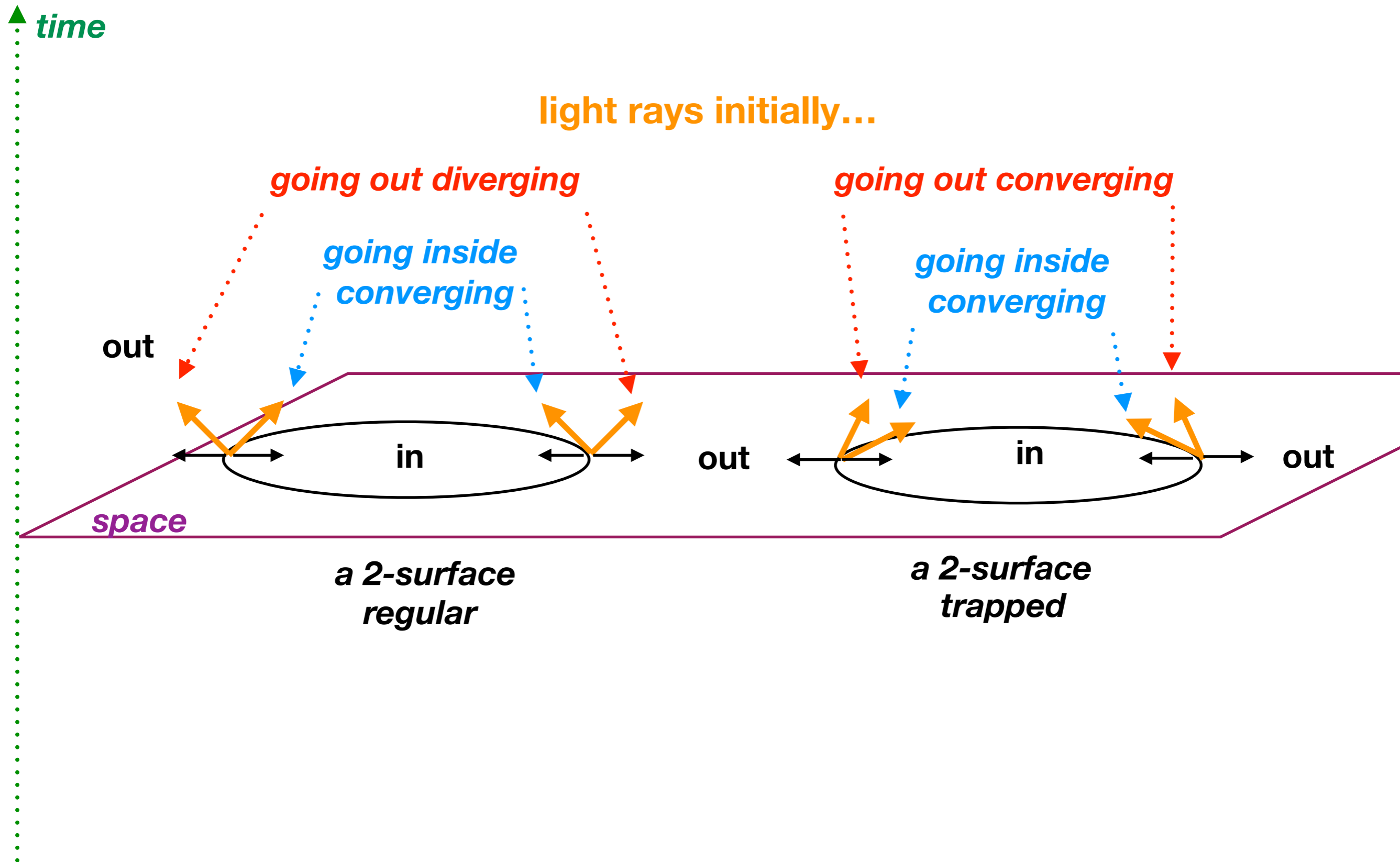
Penrose's trapped surfaces



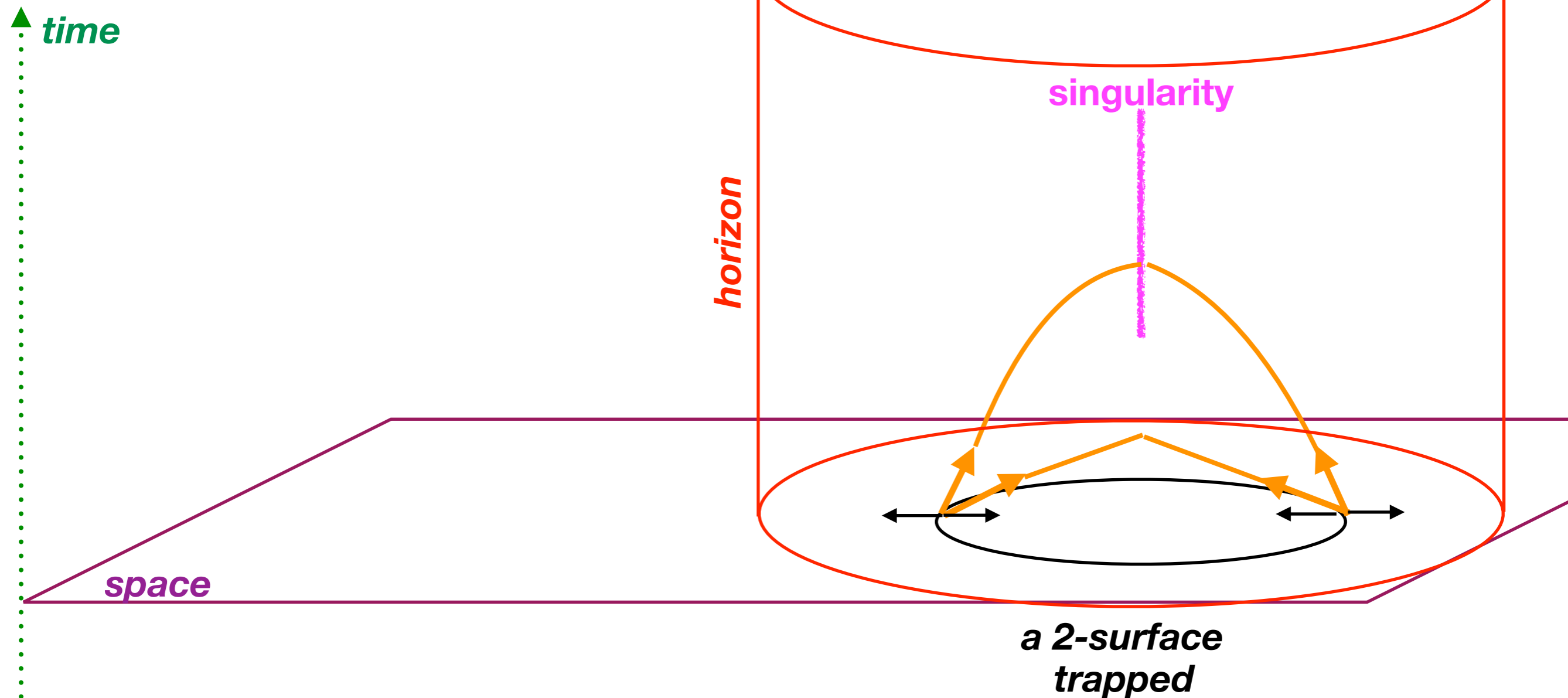
Penrose's trapped surface's



Penrose's trapped surface's



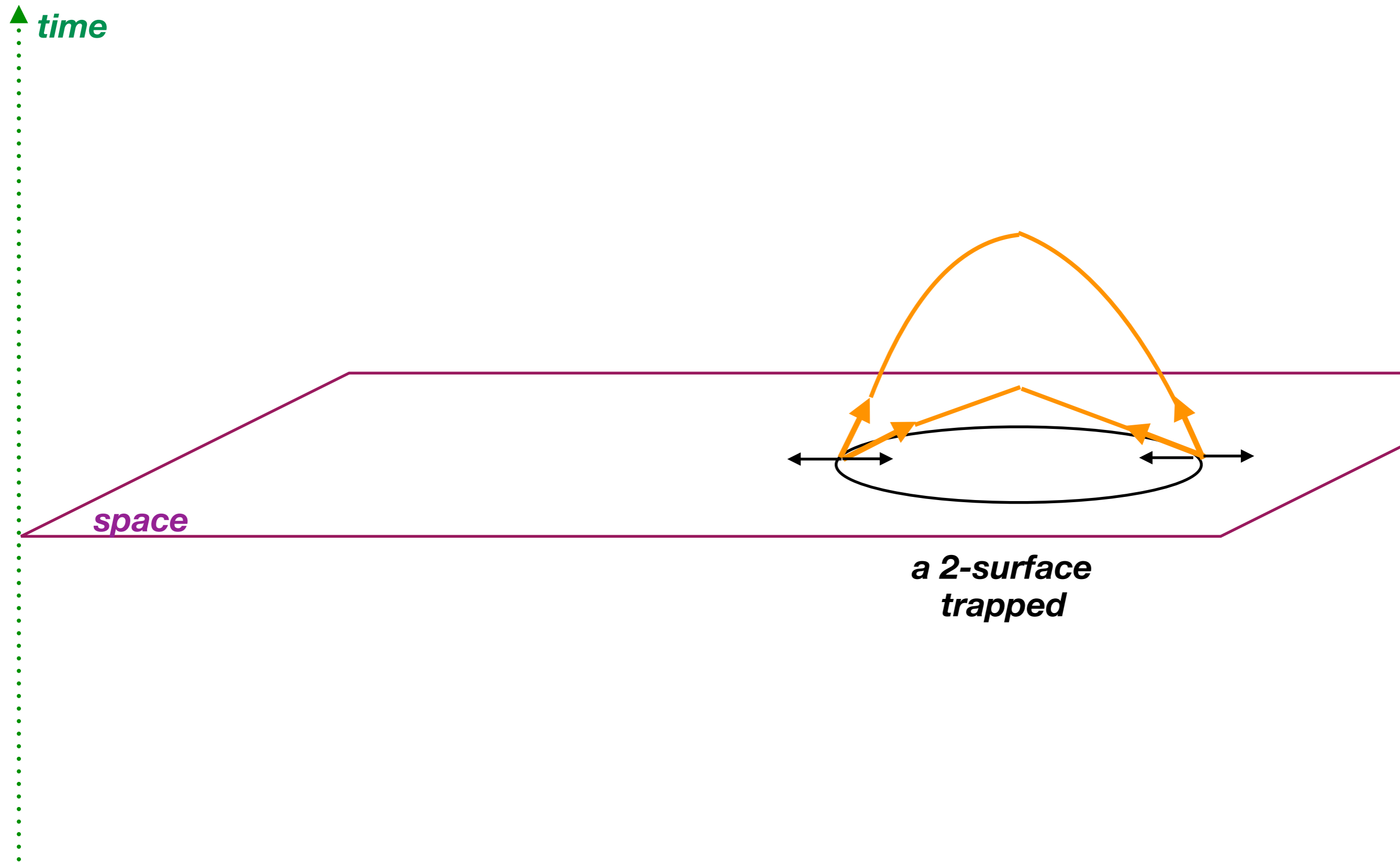
Trapped surface's in the Oppenheimer - Snyder spacetime



Penrose's idea:

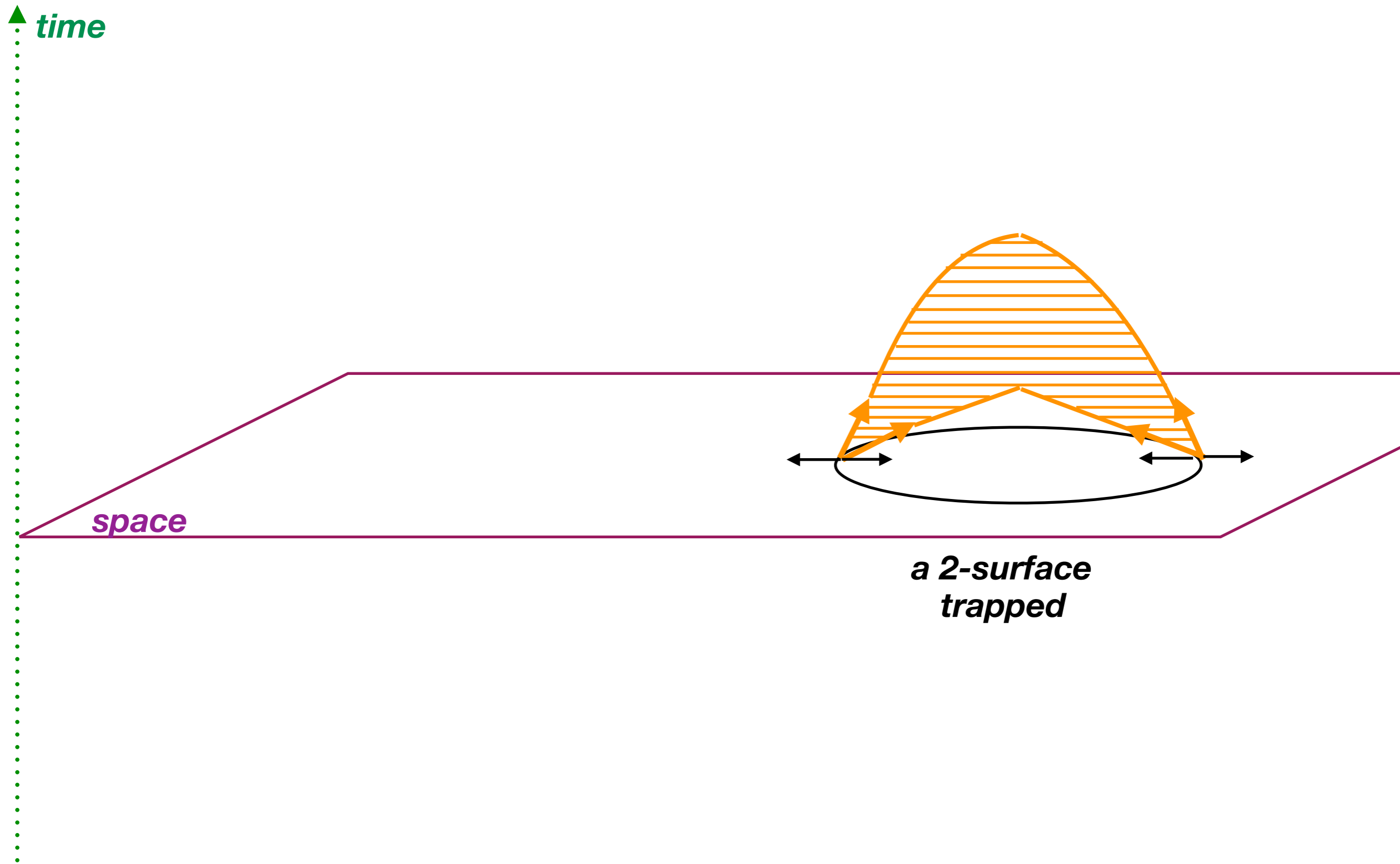
The existence of trapped surfaces is stable with respect to deformations breaking the spherical symmetry.

Trapped surface's in non-singular spacetime?



Trapped surface's in non-singular spacetime?

time



space

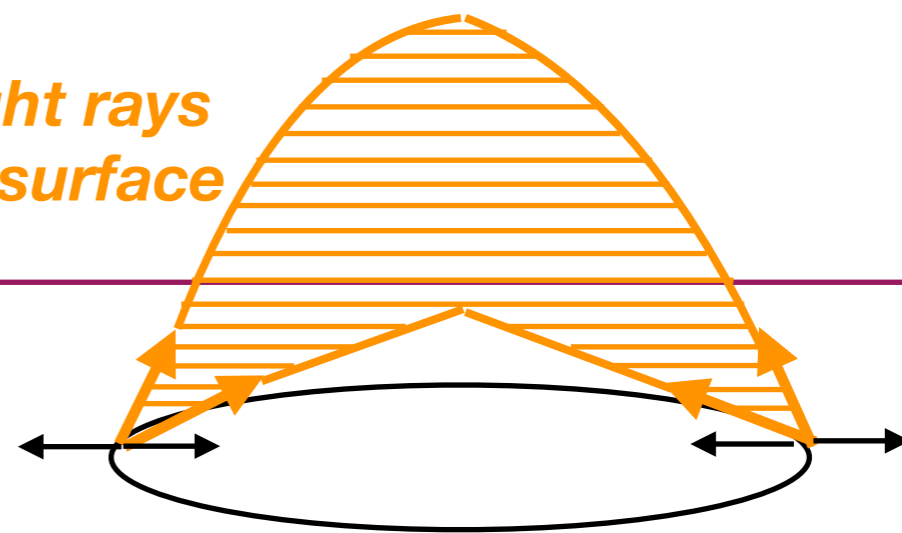
*a 2-surface
trapped*

Trapped surface's in non-singular spacetime?

time

*the 3d surface generated by the light rays
the boundary of the future of the 2-surface*

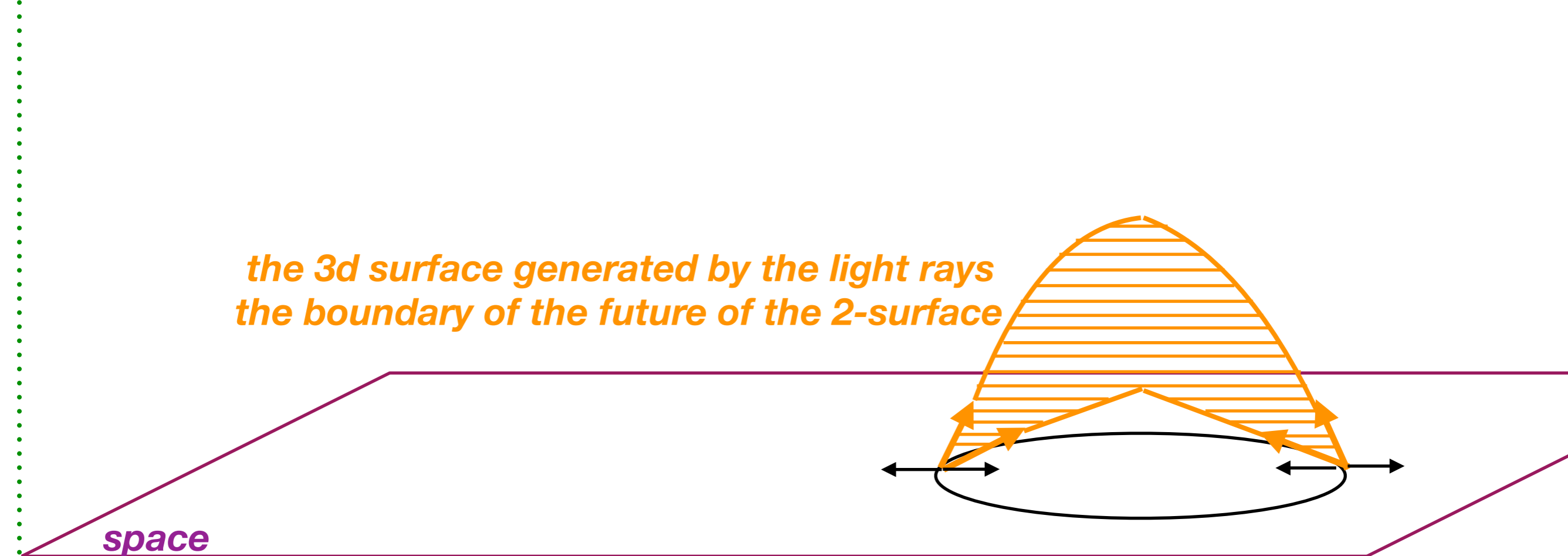
space



*a 2-surface
trapped*

Trapped surface's in non-singular spacetime?

time



the 3d surface generated by the light rays
the boundary of the future of the 2-surface

space

a 2-surface
trapped

no-singularity

Einstein's equations

energy positivity

$$T_{\mu\nu}k^\mu k^\nu \geq 0,$$

for every $k^\mu \bar{k}_\mu = 0$



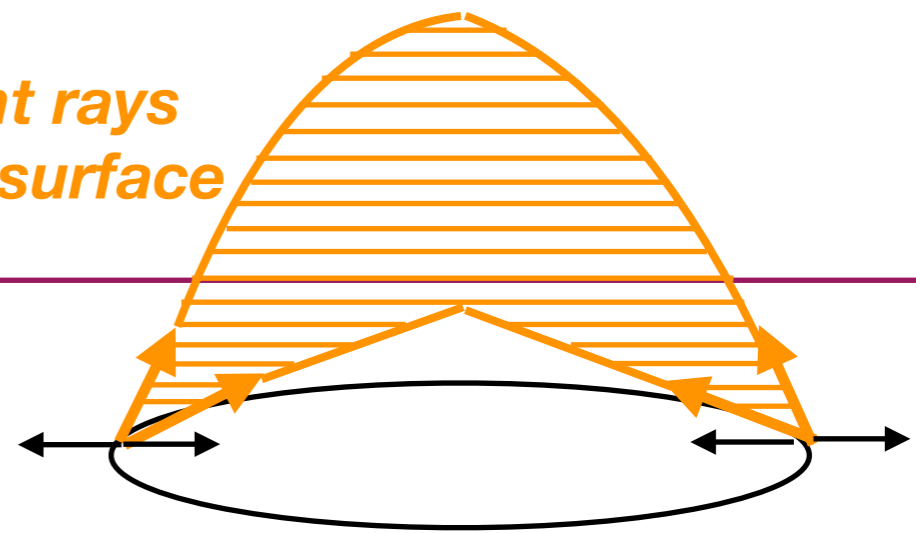
the surface is achronal, compact and closed

Trapped surface's in non-singular spacetime?

time

a 3d surface generated by the light rays
the boundary of the future of the 2-surface

space



a 2-surface
trapped

no-singularity

Einstein's equations

energy positivity

$$T_{\mu\nu} k^\mu k^\nu \geq 0,$$

for every $k^\mu \bar{k}_\mu = 0$



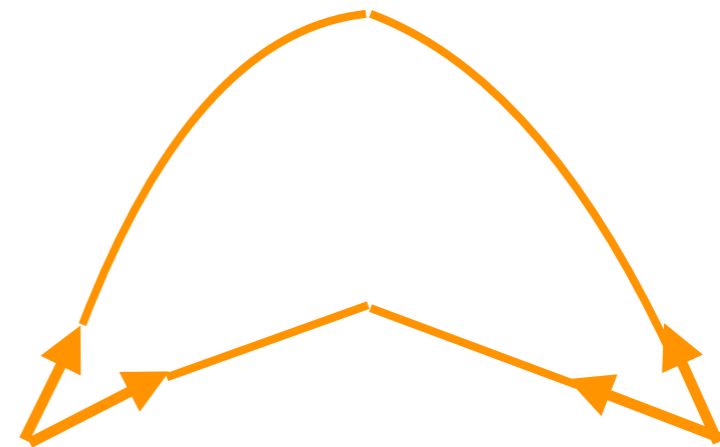
the surface is achronal, compact and closed

Uses theory of geodesic flows and conjugate points, generalised to null geodesics

Can the future have a compact, closed boundary?

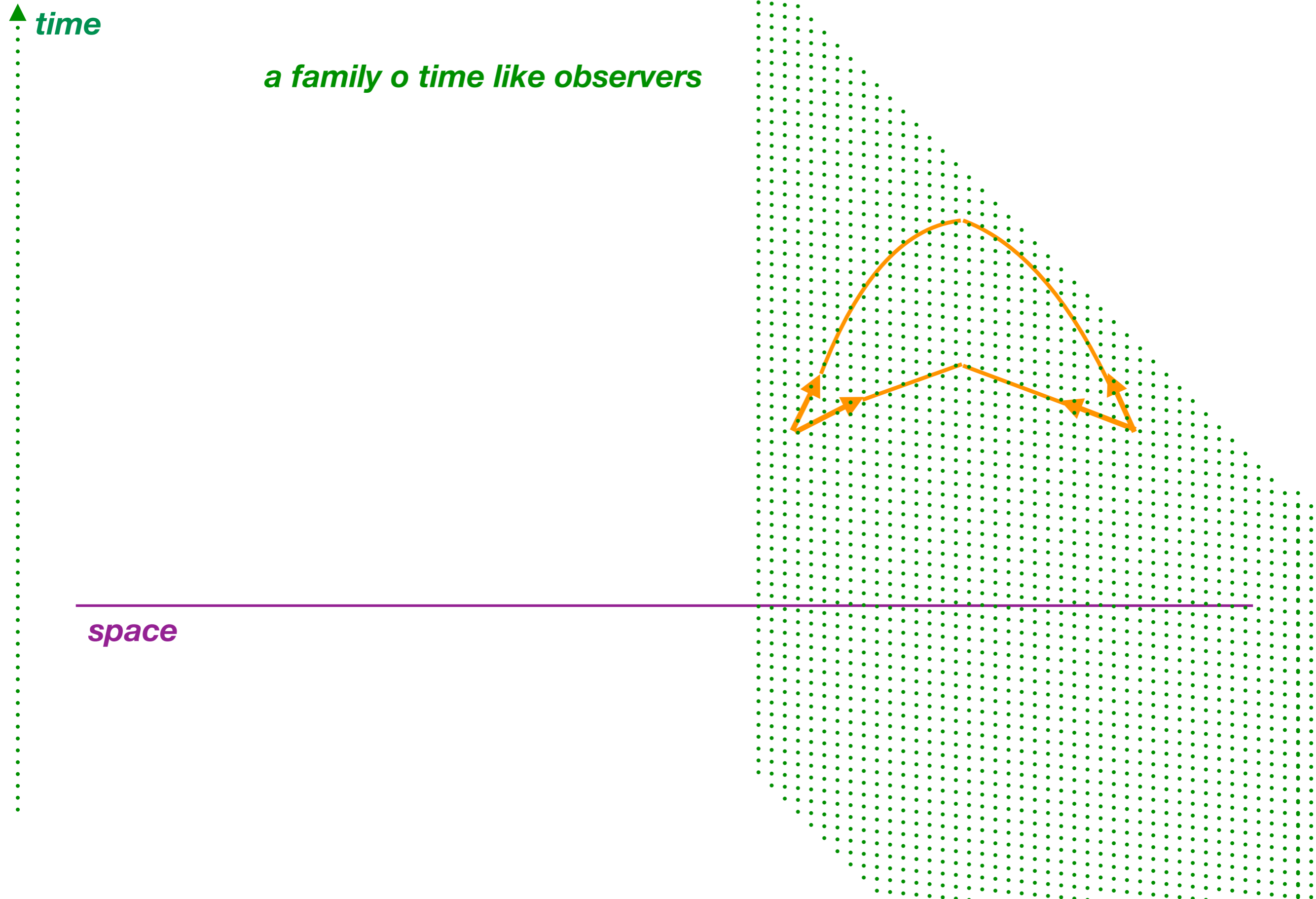


time



space

Can the future have a compact, closed boundary?



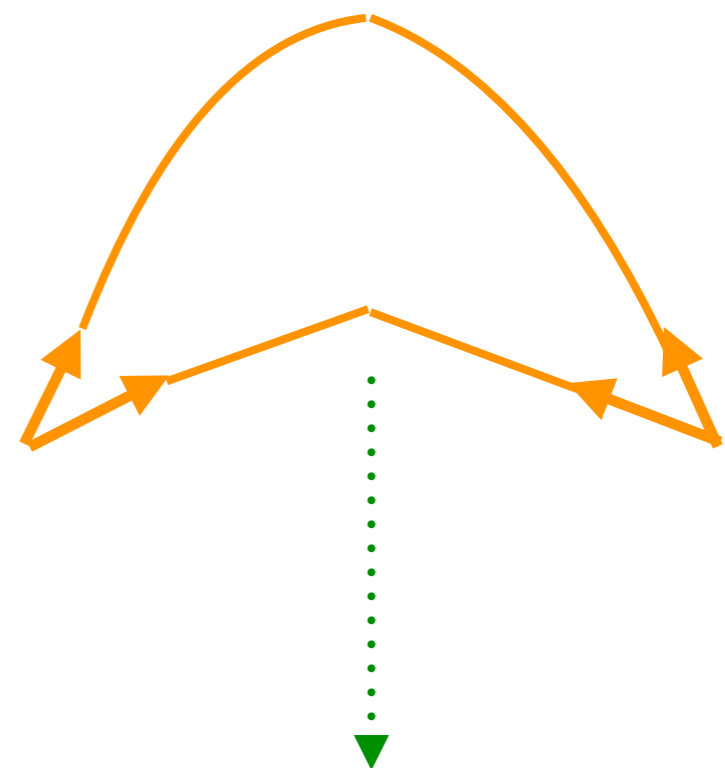
Can the future have a compact, closed boundary?

*a family of time like observers
defines a homeomorphic map*

time



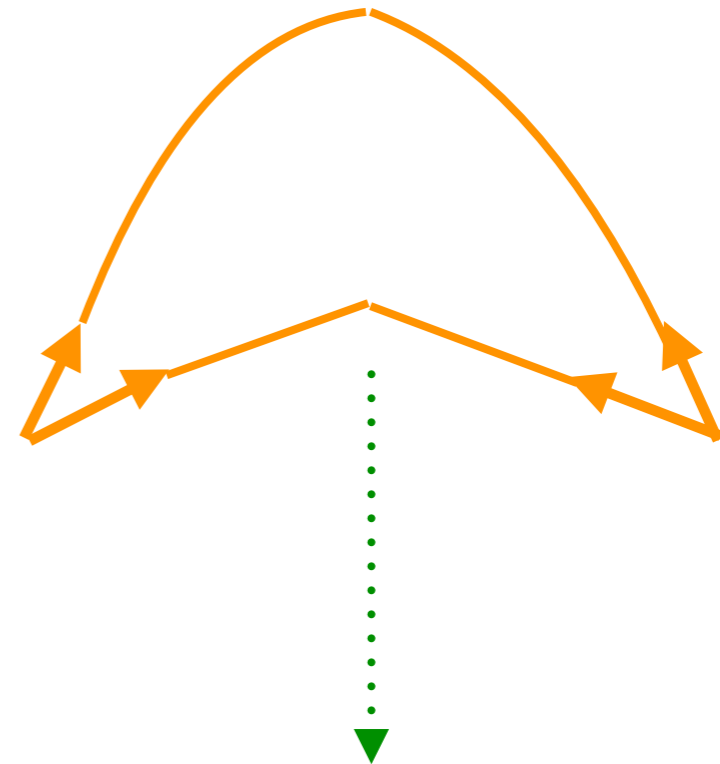
space



Can the future have a compact, closed boundary?

time

*a family of time like observers
defines a homeomorphic map
of a closed 3d surface onto an open subset
of a non-compact 3d space*



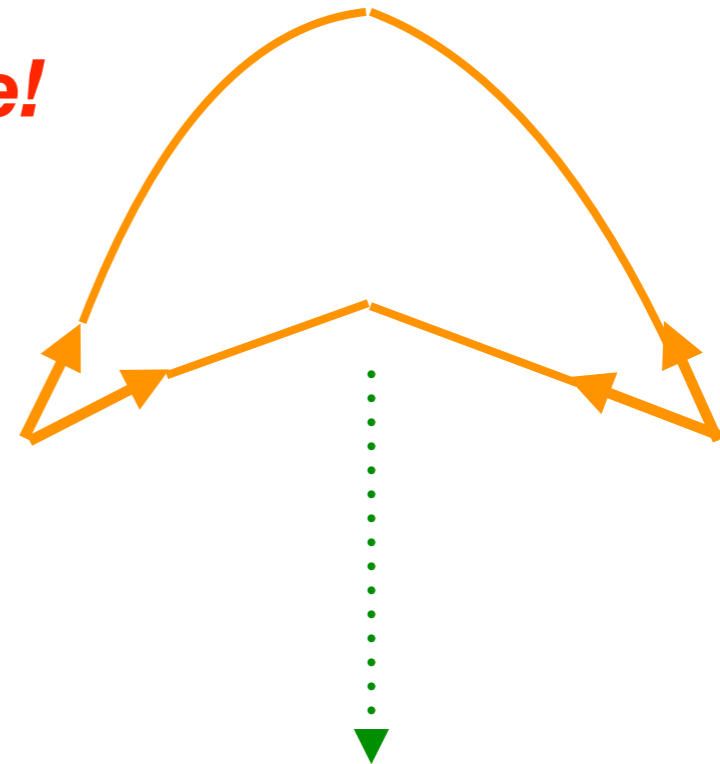
space

Can the future have a compact, closed boundary?

↑ *time*

*a family of time like observers
defines a homeomorphic map
of a closed 3d surface onto an open subset
of a non-compact 3d space*

there is no way it can be true!



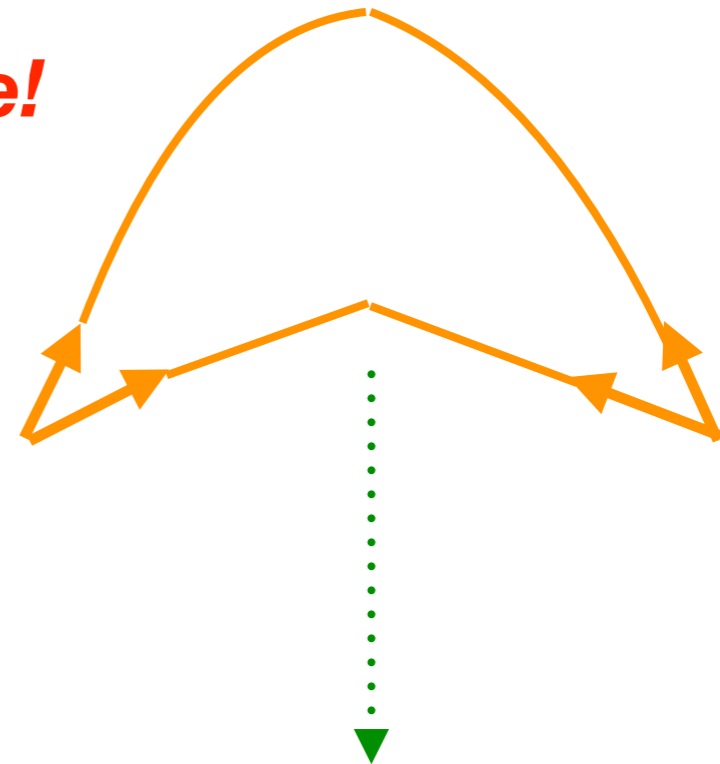
space

Can the future have a compact, closed boundary?

↑ *time*

*a family of time like observers
defines a homeomorphic map
of a closed 3d surface onto an open subset
of a non-compact 3d space*

there is no way it can be true!



space

Reasonable, however, from the point of view of developing imagination of theoretical physicist, strong assumption:
the existence of a non-compact Cauchy surface

the original drawing by Penrose

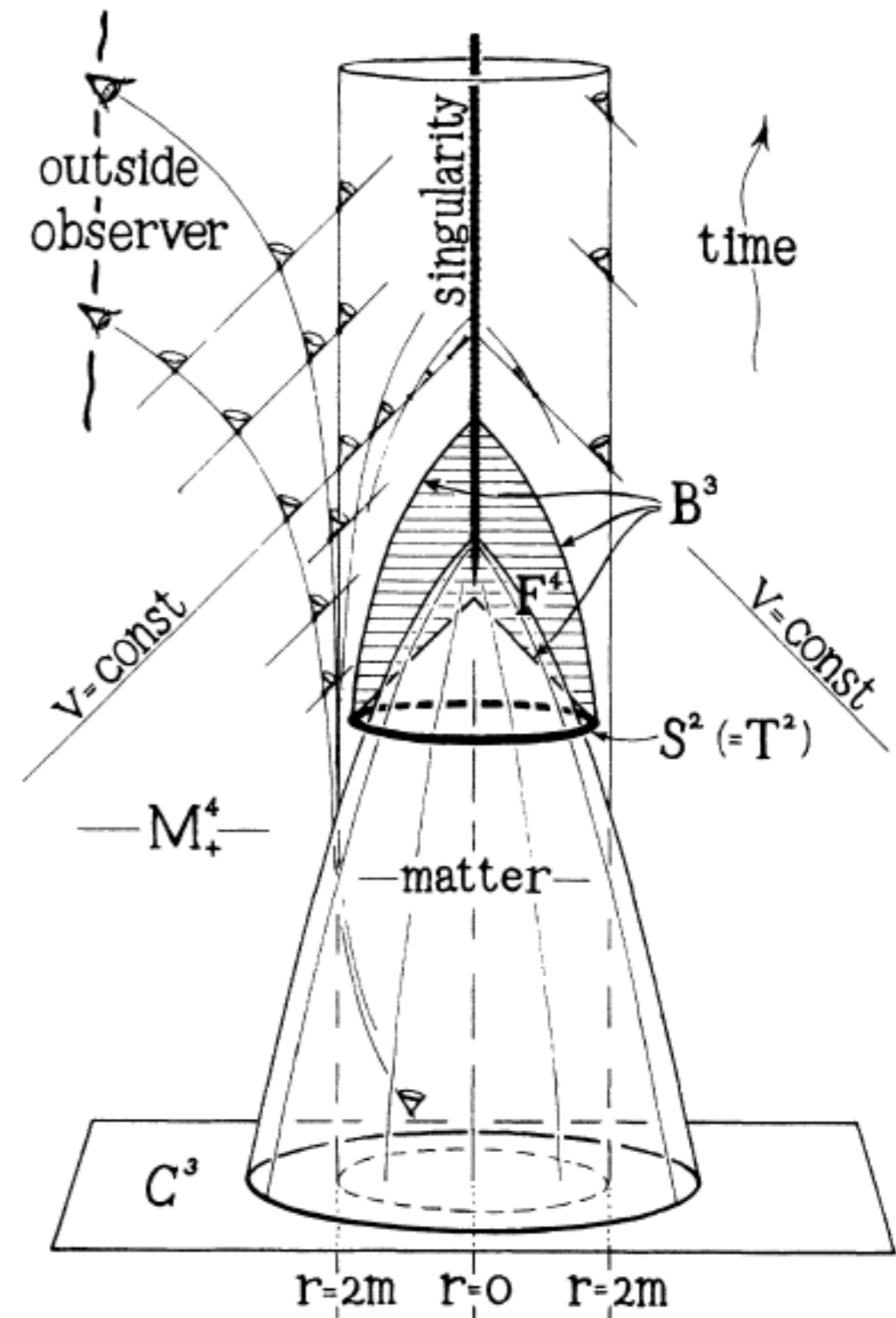


FIG. 1. Spherically symmetrical collapse (one space dimension suppressed). The diagram essentially also serves for the discussion of the asymmetrical case.

The result attracted a lot of researchers, produced lot of generalisations by Penrose himself and newcomers. One of the newcomers was Steven Hawking who dragged the research in his papers toward cosmology. When Penrose and Hawking combined their effort, they have accomplished more than each of them could do individually...

Proc. Roy. Soc. Lond. A. **314**, 529–548 (1970)

Printed in Great Britain

The singularities of gravitational collapse and cosmology

BY S. W. HAWKING

Institute of Theoretical Astronomy, University of Cambridge

AND R. PENROSE

Department of Mathematics, Birkbeck College, London

(Communicated by H. Bondi, F.R.S.—Received 30 April 1969)

A new theorem on space-time singularities is presented which largely incorporates and generalizes the previously known results. The theorem implies that space-time singularities are to be expected if *either* the universe is spatially closed *or* there is an ‘object’ undergoing relativistic gravitational collapse (existence of a trapped surface) *or* there is a point p whose

Physical conclusion:

singularity

COROLLARY. A space-time M cannot satisfy causal geodesic completeness if, together with Einstein's equations (3.5), the following four conditions hold:

(3.20) M contains no closed timelike curves.

(3.21) the energy condition (3.6) is satisfied at every point,

(3.22) the generality condition (3.10) is satisfied for every causal geodesic,

(3.23) M contains either

(i) a trapped surface,

or (ii) a point p for which the convergence of all the null geodesics through p changes sign somewhere to the past of p ,

or (iii) a compact spacelike hypersurface.

0) M contains no closed timelike curves.

1) the energy condition (3.6) is satisfied at every point.

Physical conclusion:

singularity

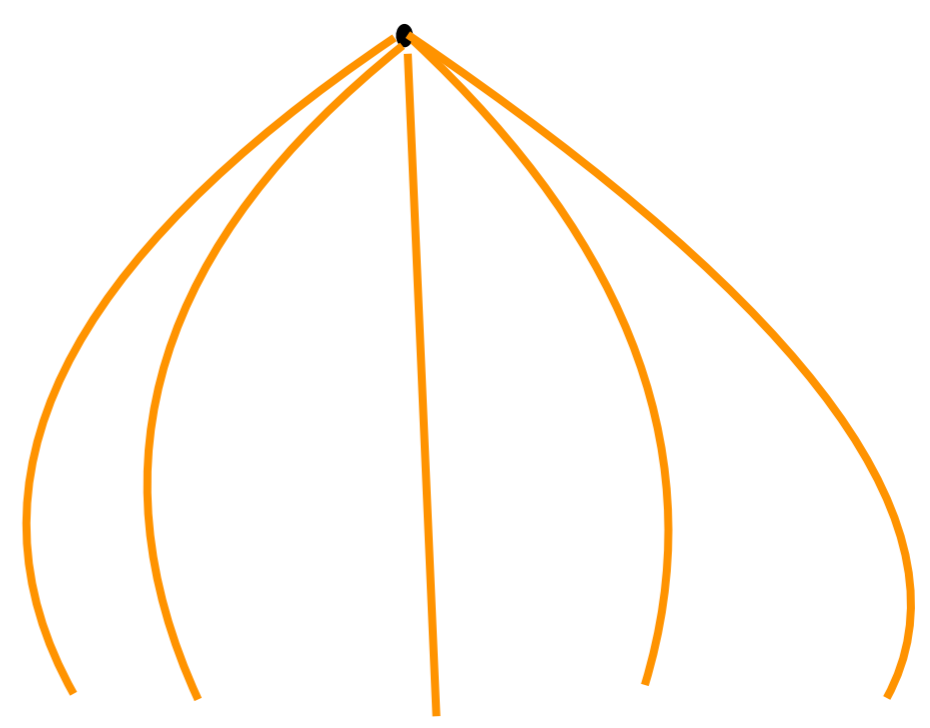
2) the generality condition (3.10) is satisfied for every causal geodesic,

3) M contains either

(i) a trapped surface,

(ii) a point p for which the convergence of all the null geodesics through p changes sign somewhere to the past of p ,

(iii) a compact spacelike hypersurface.



Physical conclusion:

singularity

COROLLARY. A space-time M cannot satisfy causal geodesic completeness if, together with Einstein's equations (3.5), the following four conditions hold:

(3.20) M contains no closed timelike curves.

(3.21) the energy condition (3.6) is satisfied at every point,

(3.22) the generality condition (3.10) is satisfied for every causal geodesic,

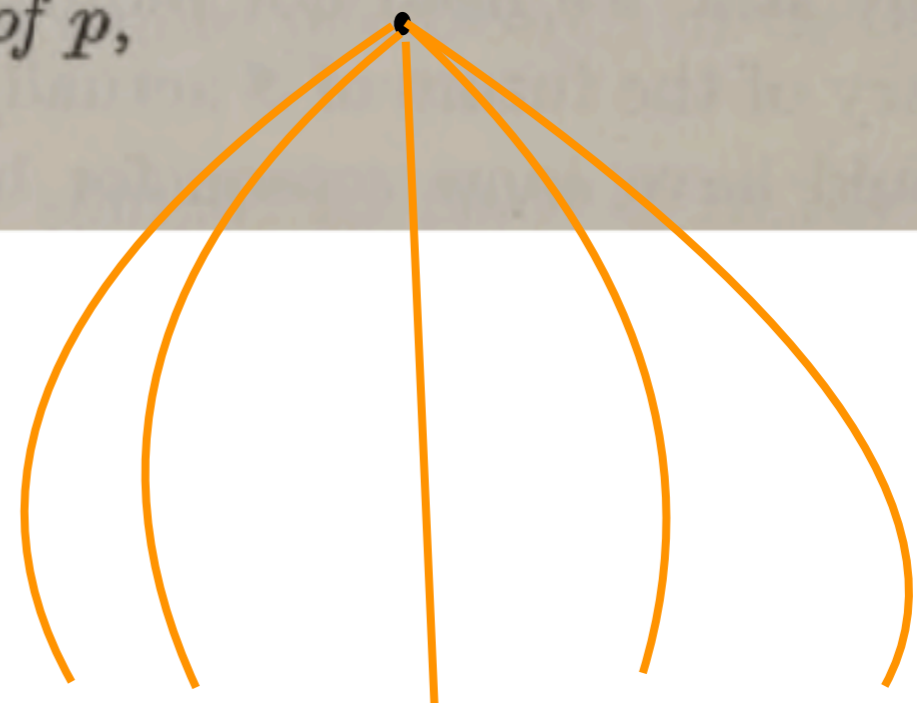
(3.23) M contains either

(i) a trapped surface,

or (ii) a point p for which the convergence of all the null geodesics through p changes sign somewhere to the past of p ,

or (iii) a compact spacelike hypersurface.

for example a closed universe



The technical reason:

THEOREM. *No space-time M can satisfy all of the following three requirements together:*

- (3.1) *M contains no closed timelike curves,*
- (3.2) *every inextendible causal geodesic in M contains a pair of conjugate points,*
- (3.3) *there exists a future- (or past-) trapped set $S \subset M$.*

Conclusions on the singularities

Singularities of spacetime are realistic consequences of gravitational collapse - it applies to stars, galaxies, and universes.

The singularities amount to incompleteness of some geodesic curves, however, not much more is known about their nature.

Can we see singularities? No, whenever Penrose's cosmic censorship conjecture is true.

Is the cosmic censorship conjecture true? Yes, provided the Penrose inequality is satisfied. Then, a black hole horizon forms.

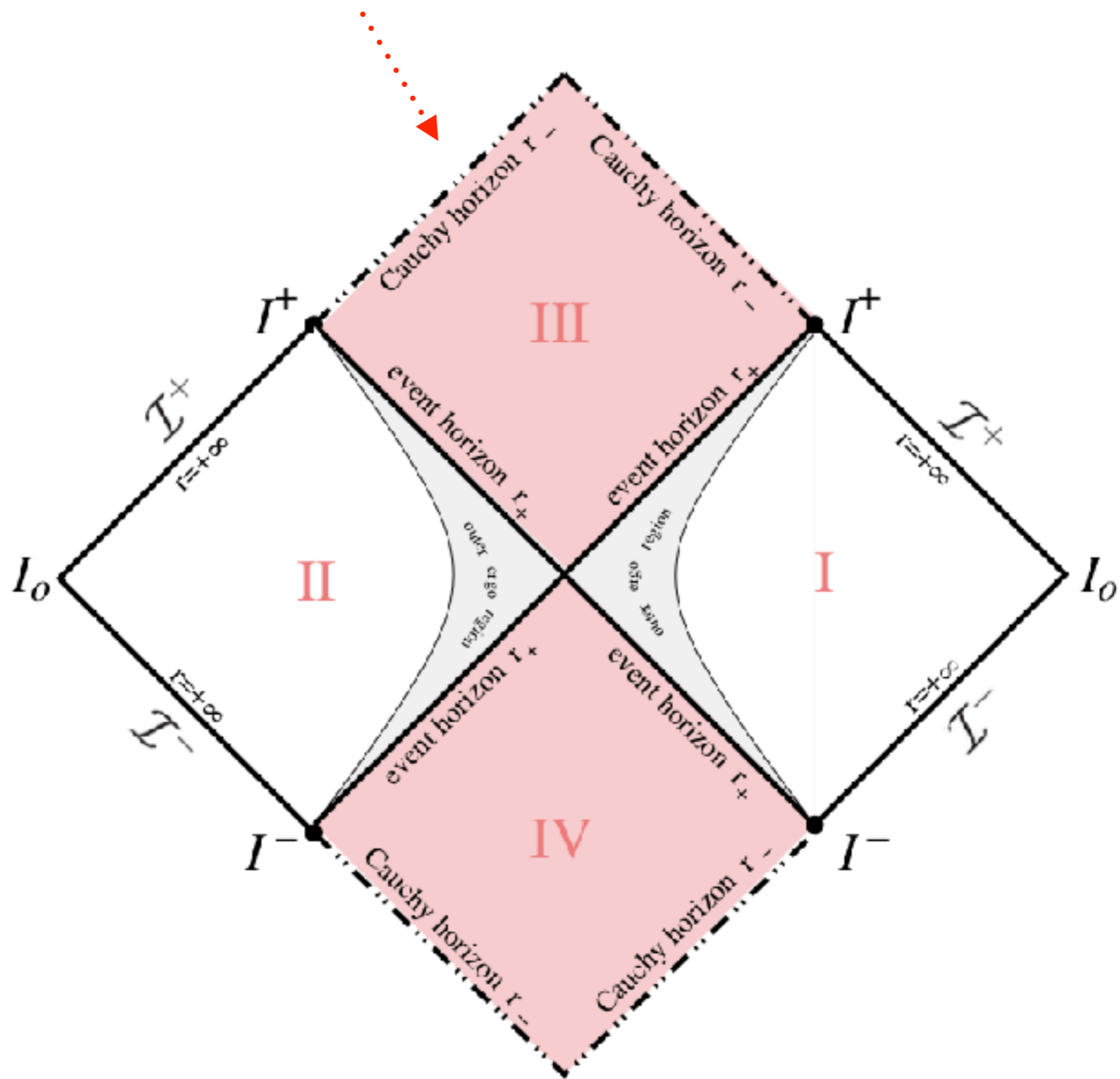
Some of the energy conditions are sensitive to the existence of a positive cosmological constant ...

Other major results on black holes by Penrose

General definition of black hole spacetime and an event horizon as the boundary of the past of the future null infinity.

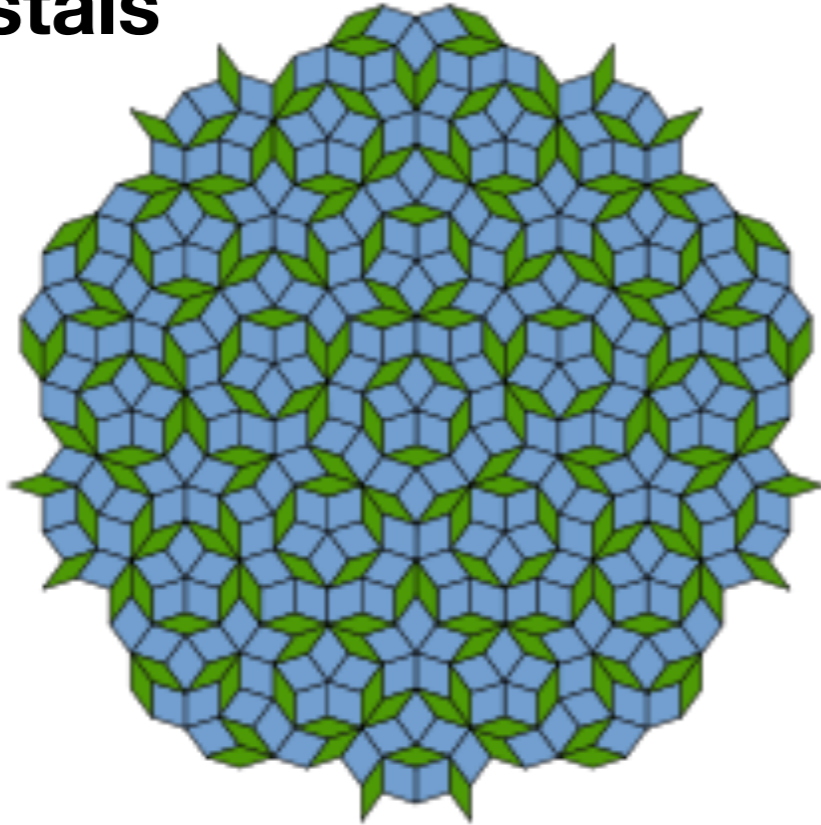
Extraction of energy from black hole on the cost of its angular momentum.

Instability of the inner horizon in the Kerr-Newman black hole with respect to falling in perturbations of matter fields.

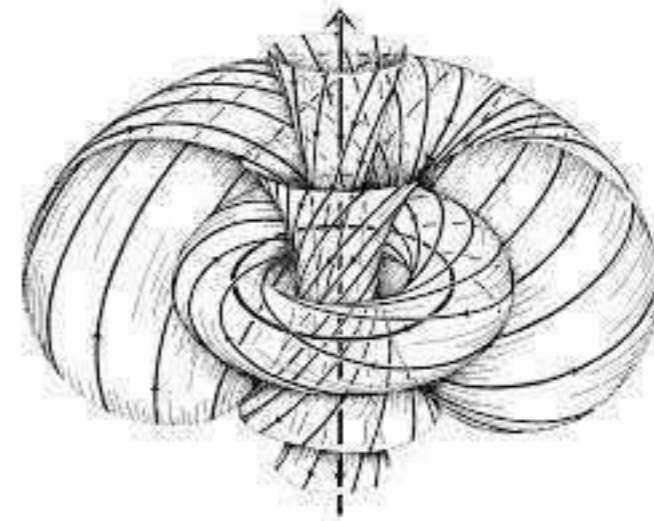


Other major results by Penrose

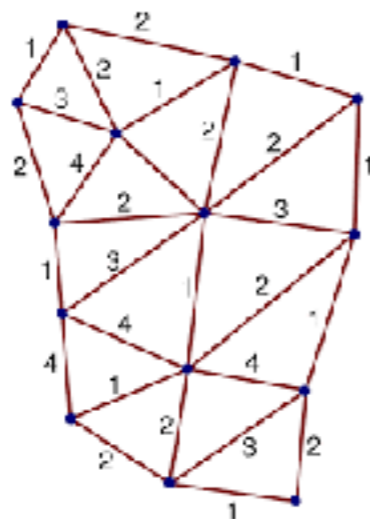
Aperiodic tiling and existence of quasicrystals



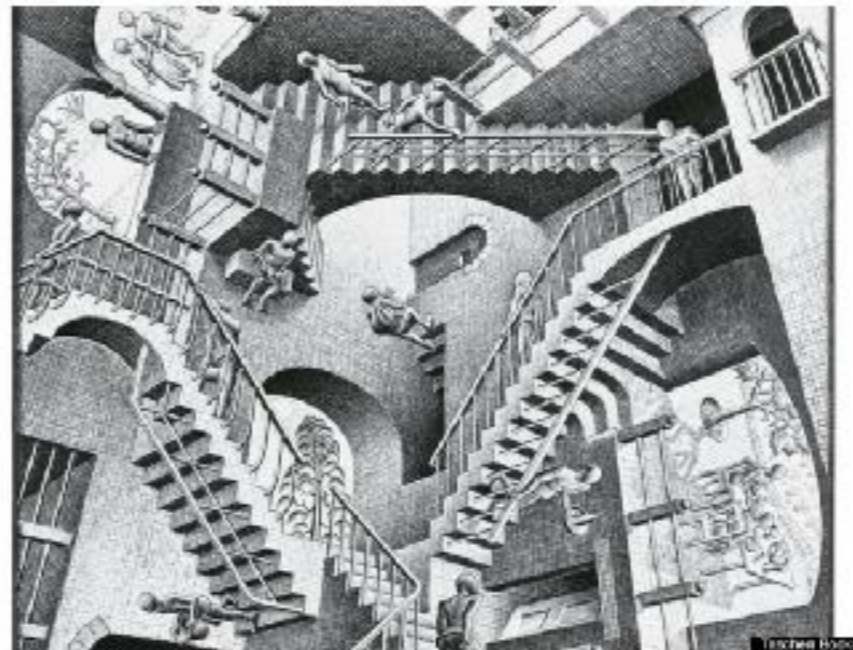
The twistor theory in mathematics



The spin-networks used in quantum models



Impossible objects in painting:



Some early biography of Roger Penrose

Born in Colchester, Essex, Roger Penrose is a son of Margaret (Leathes) and psychiatrist and geneticist Lionel Penrose.[b] His paternal grandparents were J. Doyle Penrose, an Irish-born artist, and The Hon. Elizabeth Josephine Peckover; and his maternal grandparents were physiologist John Beresford Leathes and his wife, Sonia Marie Natanson,[5][6] a Jewish Russian who had left St. Petersburg in the late 1880s.[7][5] His uncle was artist Roland Penrose, whose son with photographer Lee Miller is Antony Penrose.[8][9] Penrose is the brother of physicist Oliver Penrose, of geneticist Shirley Hodgson, and of chess Grandmaster Jonathan Penrose. [10][11]

Penrose spent World War II as a child in Canada where his father worked in London, Ontario.[12] Penrose attended University College School and University College London, where he graduated with a first class degree in mathematics.[10]

Penrose spent the academic year 1956-57 as an Assistant Lecturer at Bedford College, London and was then a Research Fellow at St John's College, Cambridge. He met there Dennis Sciama.