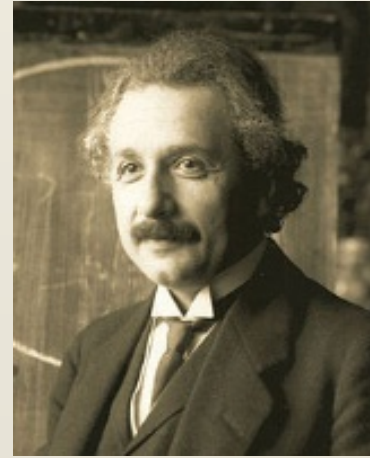


Heute vor 100 Jahren – zwischen Spezieller und Allgemeiner Relativitätstheorie (und danach)

Franz Embacher

Fakultät für Physik
Universität Wien



Vortrag am GRG17 Parhamerplatz
Wien, 30. 11. 2011

Inhalt

- Raum und Zeit vor der speziellen Relativitätstheorie
- Spezielle Relativitätstheorie und die Raumzeit
- Vor 100 Jahren: das Zwillingsparadoxon
- Die Wandlung der Kausalstruktur
- Und was ist mit der Gravitation? – Äquivalenzprinzip
- Raumzeit und Krümmung: die Allgemeine Relativitätstheorie
- Schwarze Löcher und Singularitäten
- Das Universum: statisch → dynamisch → beschleunigt
- Quantentheorie und die Eigenzeit
- Quantengravitation?

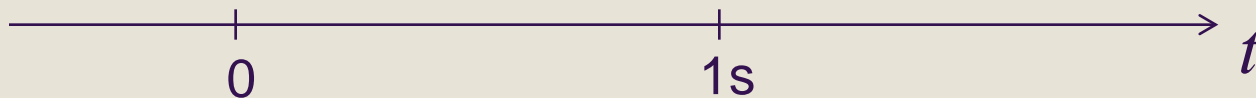
Raum und Zeit in der nichtrelativistischen Physik

Absolute Zeit

Isaac Newton (1687)

„Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.“

Mathematische Beschreibung:
„Zeitachse“



Analog: absoluter Raum

Das Licht

- **1864**
James Clerk Maxwell veröffentlicht seine Theorie der elektromagnetischen Phänomene. Licht ist eine elektromagnetische Welle. Elektromagnetische Wellen pflanzen sich mit **Lichtgeschwindigkeit** fort.

In welchem Medium?

→ Äther!





Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

- ab **1881**
Ätherdriftexperimente (Michelson, Morley,...)



Michelson-
Interferometer
Potsdam 1881
Cleveland 1887

...

Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

Bis zum Jahr 1905:

- Die Bewegung der Erde relativ zum Äther konnte **nicht** nachgewiesen werden.
- Henri Poincare, Hendrik Antoon Lorentz:
 - „Versteckt“ sich der Äther, indem er die Längen von Maßstäben und den Gang von Uhren **scheinbar** verändert?
 - Ist daher die bisherige Auffassung von Raum und Zeit falsch? Gibt es „wahre“ und „scheinbare“ Längen und Zeiten?
 - Ist die Lichtgeschwindigkeit **scheinbar** für alle Beobachter gleich, der Äther also „unentdeckbar“?
- Lorentztransformation, Lorentzkontraktion, Zeitdilatation, Relativitätsprinzip, Konstanz der Lichtgeschwindigkeit,...

Spezielle Relativitätstheorie – die radikale Lösung

- 1905

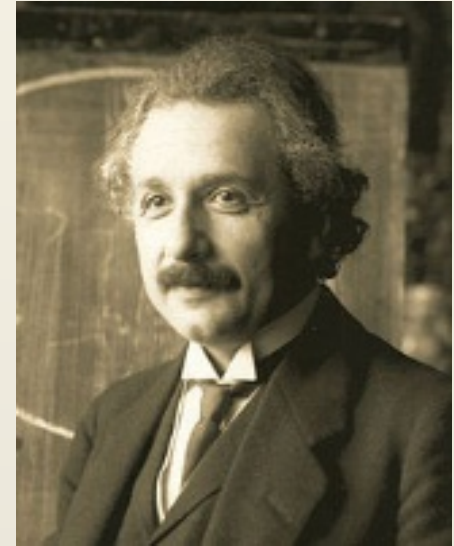
Albert Einsteins zwei Postulate:

1.) Es **gibt keinen Äther** (und daher auch **keine absolute Bewegung**)!

Bewegung ist immer **relativ**. Alle Bezugssysteme (**Inertialsysteme**) sind „gleichberechtigt“.

2.) Die Lichtgeschwindigkeit hat in **jedem** Bezugssystem den gleichen Wert (heute: $c = 299\,792\,458$ m/s).

→ Spezielle Relativitätstheorie



Effekte der Speziellen Relativitätstheorie

- Relativität der Gleichzeitigkeit

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/Gleichzeitigkeit/>

- Zeitdilatation

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/Zeitdilatation/>

- Längenkontraktion

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/Laengenkontraktion/>

- Und: Die **Lichtgeschwindigkeit** ist die **Obergrenze** für die Bewegung von Körpern und für die Übermittlung von Signalen!

Hermann Minkowski 1908...

„Von Stund´ an sollen
Raum für sich und
Zeit für sich völlig zu
Schatten herabsinken
und nur noch eine Art
Union der beiden soll
Selbständigkeit
bewahren.“

→ die Raumzeit!



Wie sind die relativistischen Effekte zu deuten?

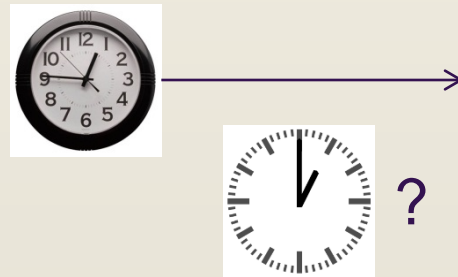
Einsteins Lösung setzte sich nicht über Nacht durch.

- Wie kann „die Zeit“ für eine Uhr schneller vergehen als für eine andere *und umgekehrt*? Könnte es sich um einen scheinbaren Effekt handeln, eine Art „Täuschung“?
- Betreffen die relativistischen Effekte nur „scheinbare“ Längen und Zeiten, die von „wahren“ Längen und Zeiten zu unterscheiden sind?

Wie sind die relativistischen Effekte zu deuten?

Problem:

- Wie misst man die „Ganggeschwindigkeit“ einer **bewegten** Uhr?
Mit einer anderen Uhr? → Nein!



Das ist auch eine große Herausforderung für unsere Vorstellung!

Vor hundert Jahren...

- 1911
Paul Langevin erfindet
das **Zwillingsparadoxon!**



Alice geht auf Reisen

Ein Gedankenexperiment:

Charly

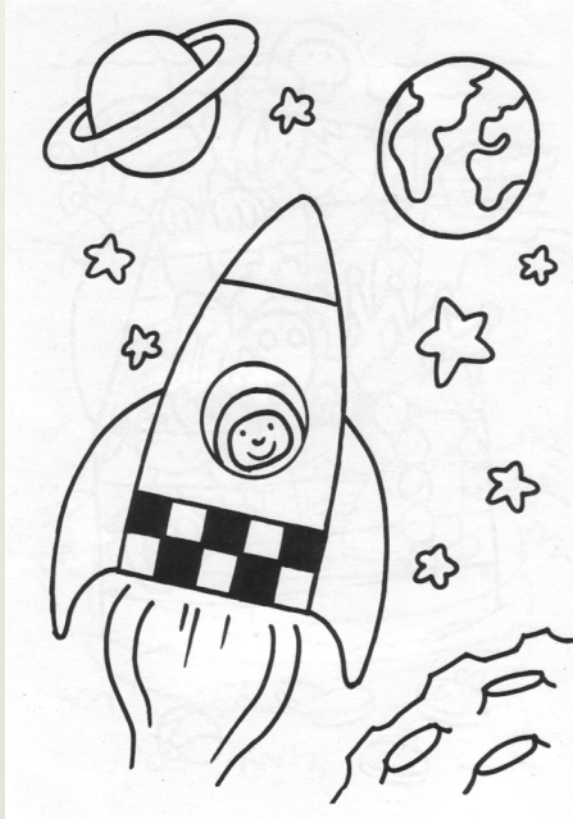


Alice

Alice möchte das Universum erkunden und geht auf Reisen. Sie verabschiedet sich von ihren Freunden...

Alice geht auf Reisen

...und steigt in ihr Raumschiff.

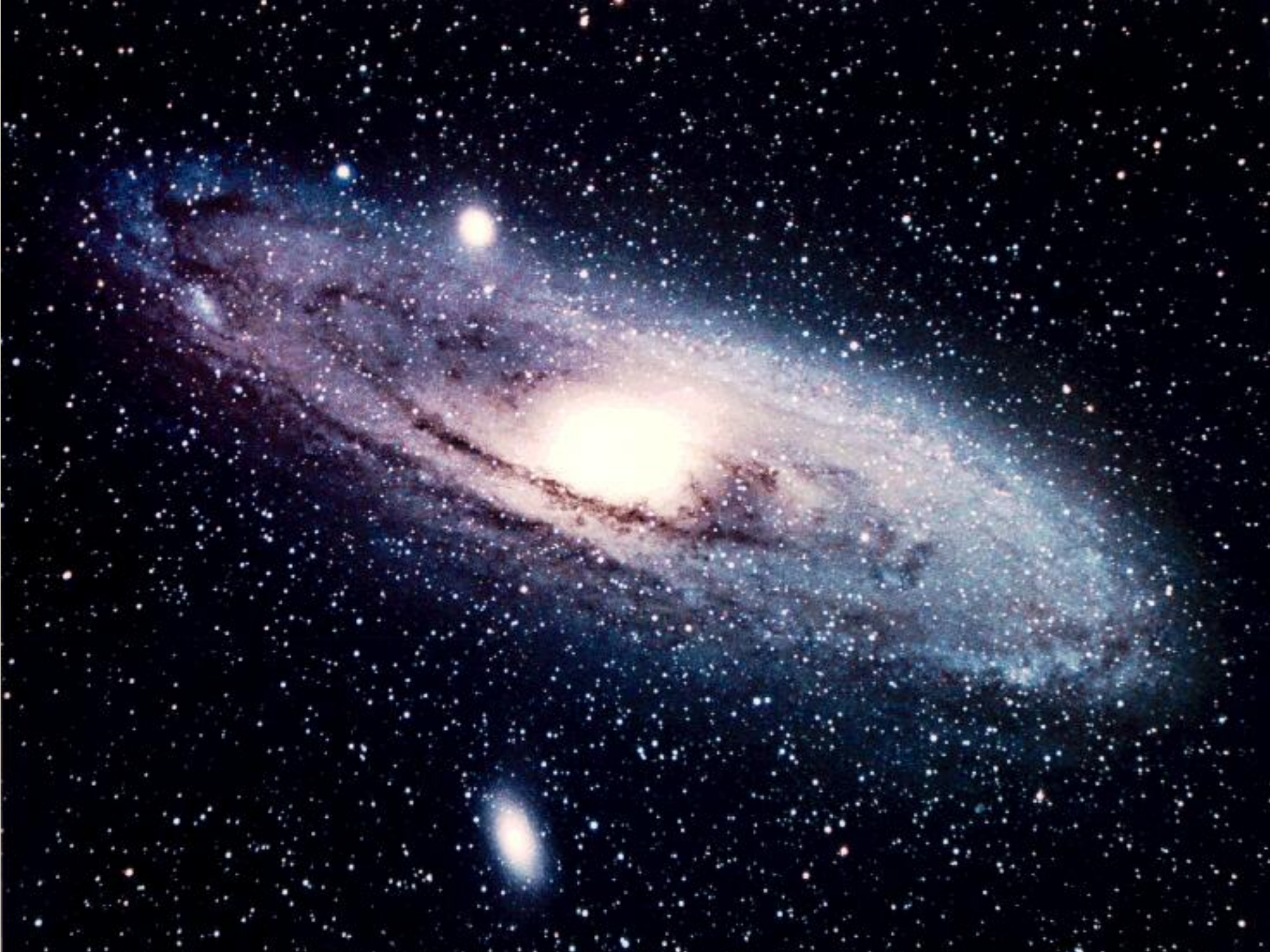


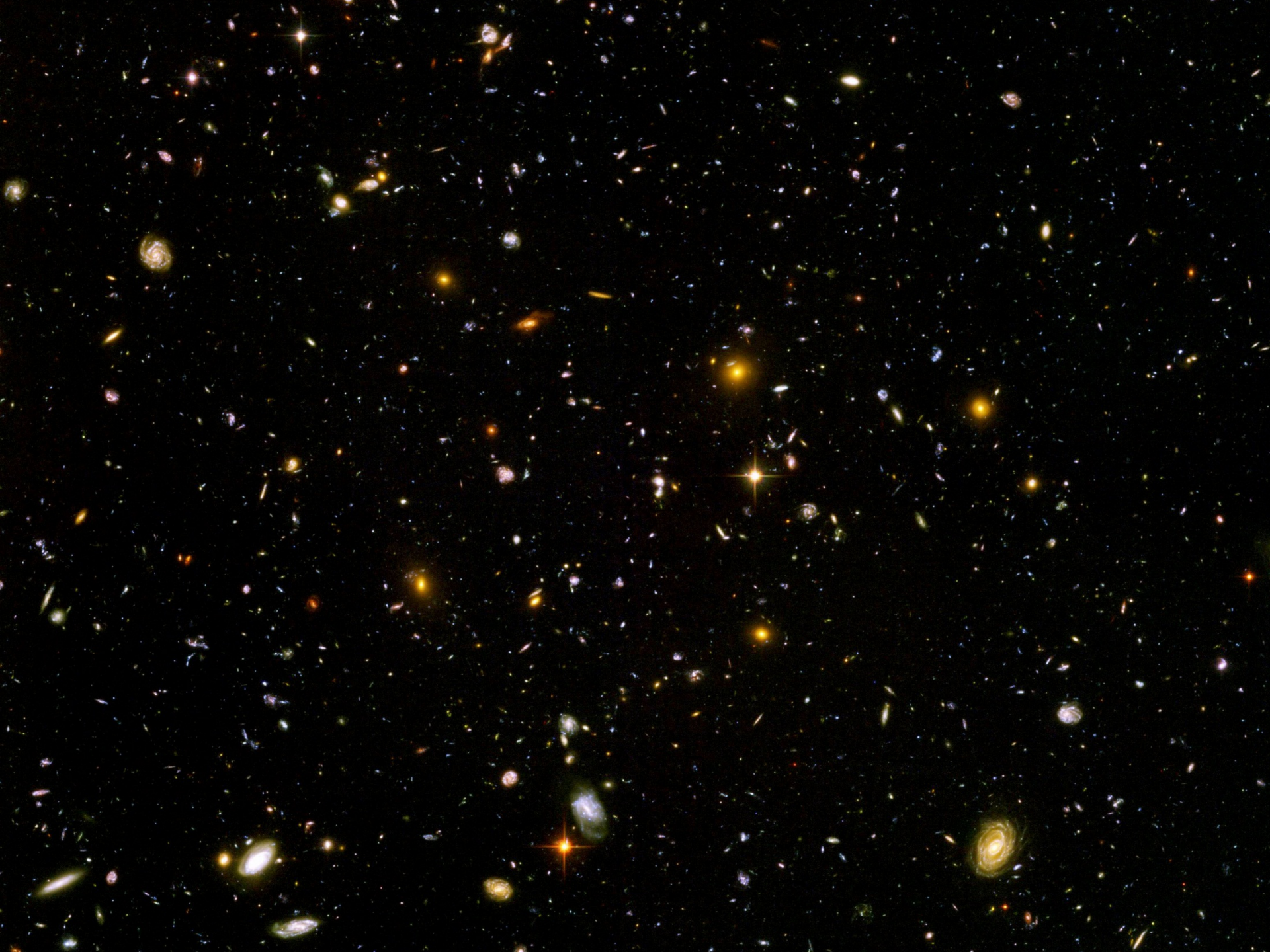
Begleiten wir sie auf ihrer Reise...





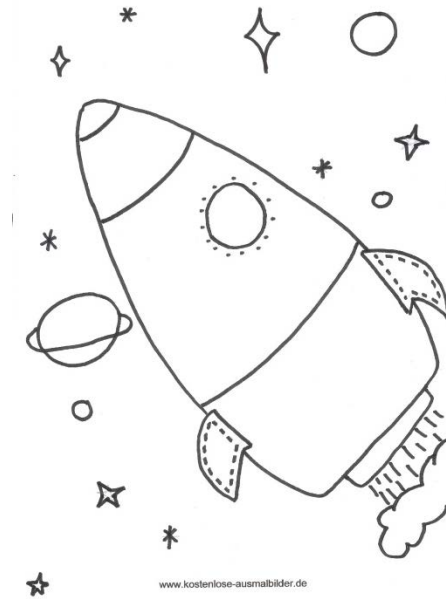






Alice kehrt zurück

Alice kehrt von ihrer Reise zur Erde zurück...



Alice kehrt zurück

... und erlebt eine Überraschung: Ihre Reise hat eine Woche gedauert, aber...



Charly

Das **Zwillingsparadoxon!**

Vor hundert Jahren...

- **Zwillingsparadoxon**: Zwei Uhren werden getrennt, bewegen sich auf unterschiedliche Weise und werden danach wieder zusammengeführt.
→ Einsteins (und Lorentz') Gleichungen sagen einen **Gangunterschied** voraus!

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Damit ist das Problem, wie die „Ganggeschwindigkeit“ einer bewegten Uhr gemessen werden kann, umgangen! Ein unterschiedliche Zeitanzeige ist etwas viel Handfestes!

- Max von Laue deutet das Zwillingsparadoxon in der Form, die auch heute noch gilt.

Relativistische Effekte sind real

Bewegte **Uhren** gehen *ganz real* langsamer!



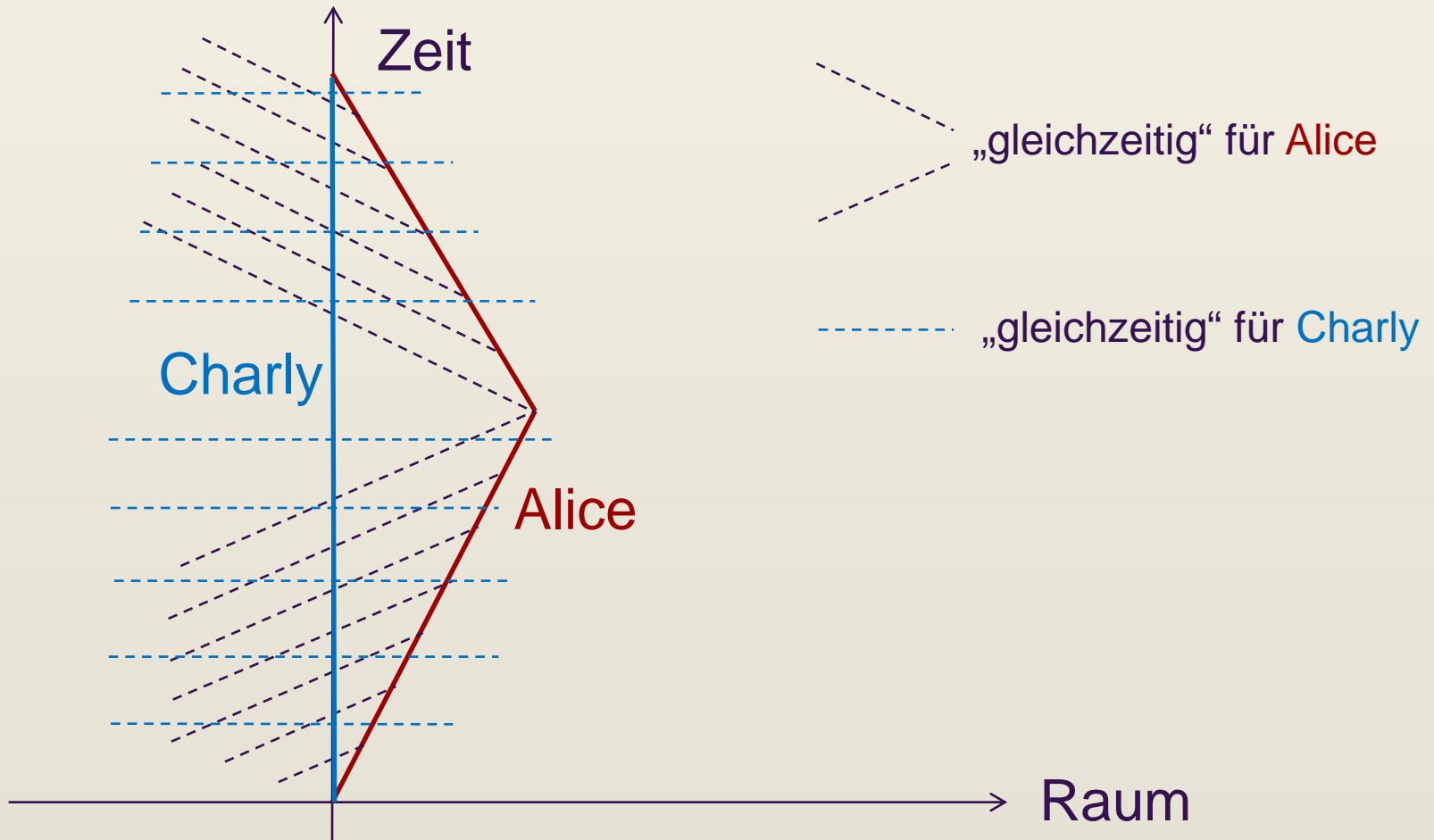
Uhr von Charly



Uhr von Alice

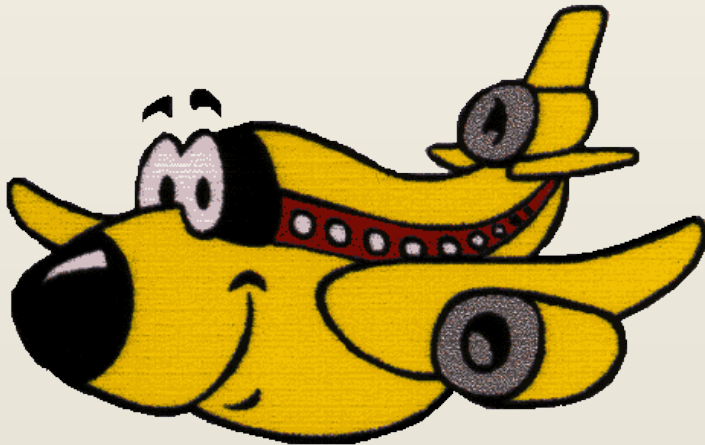
Die moderne Deutung – Minkowski-Diagramm

Grafische Darstellung der Gleichzeitigkeitsverhältnisse:



Relativistische Effekte sind real

Bewegte **Körper** sind *ganz real* kürzer!



langsam



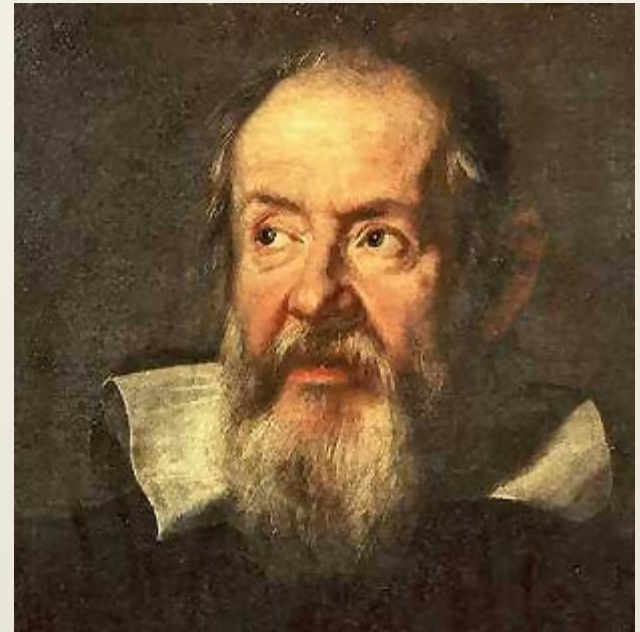
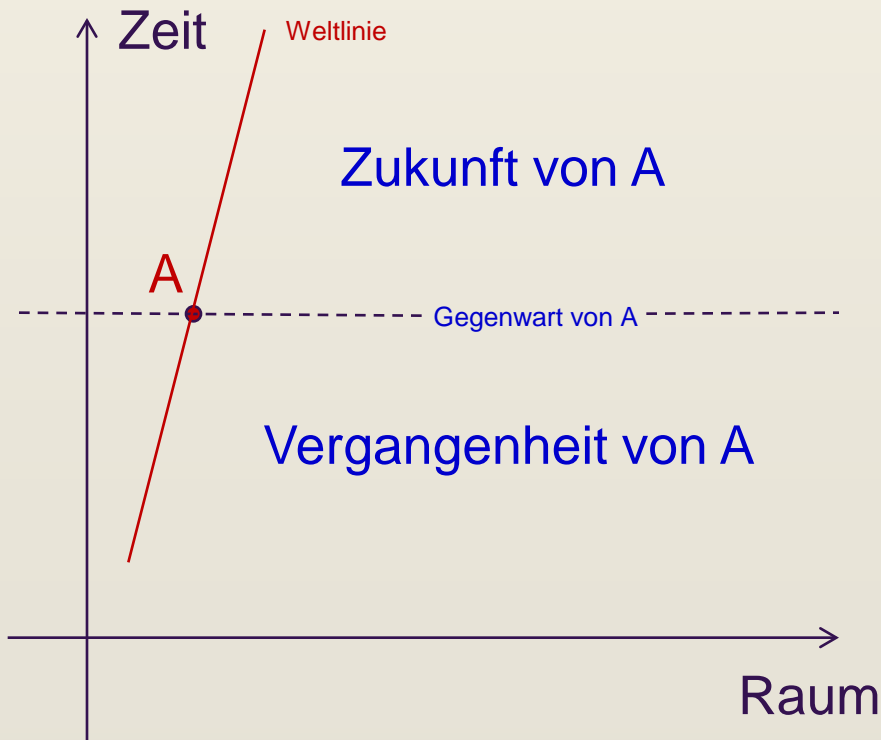
schnell



ganz
schnell

Die Wandlung der Kausalstruktur

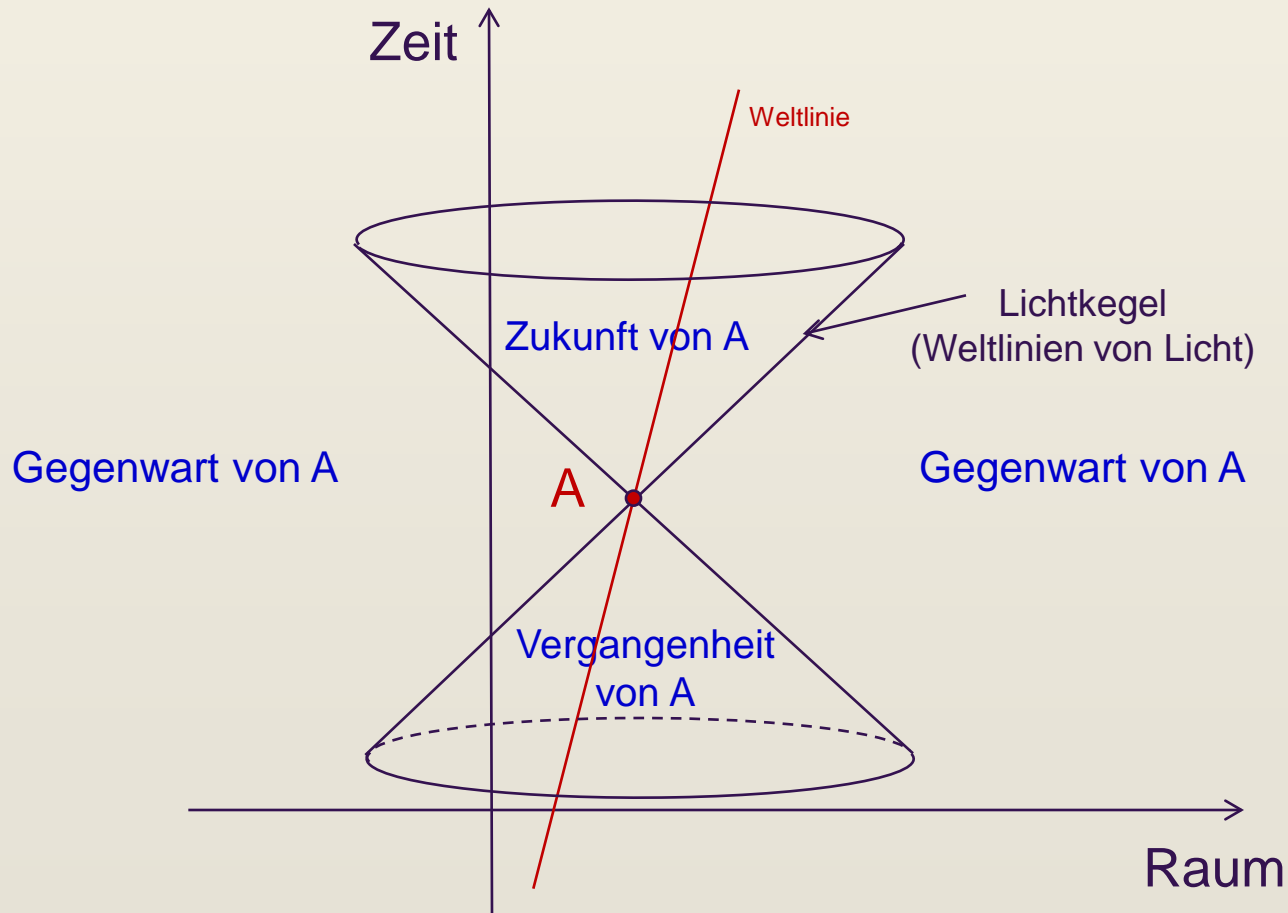
Kausalstruktur der „Galileischen Raumzeit“



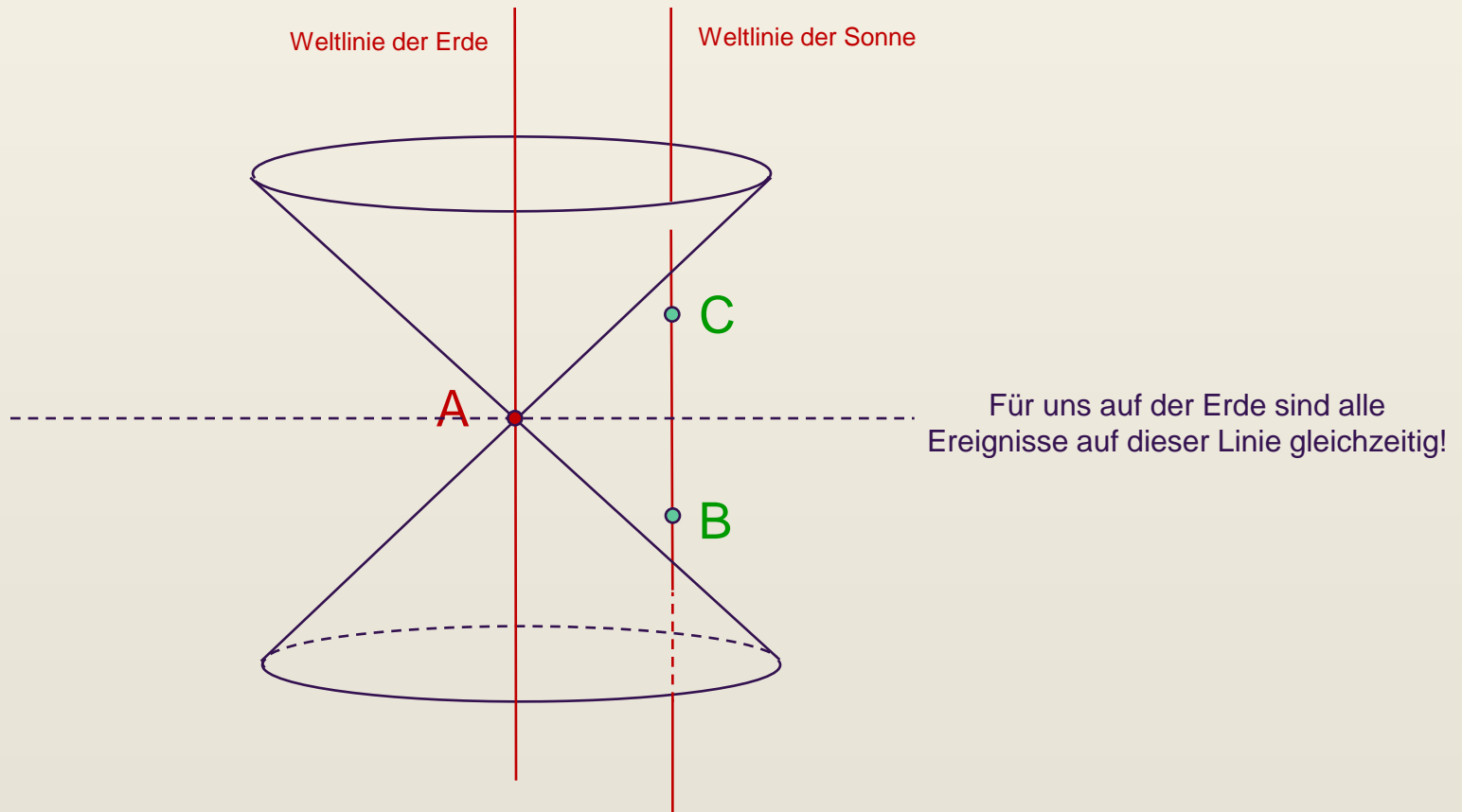
Galileo Galilei

Die Wandlung der Kausalstruktur

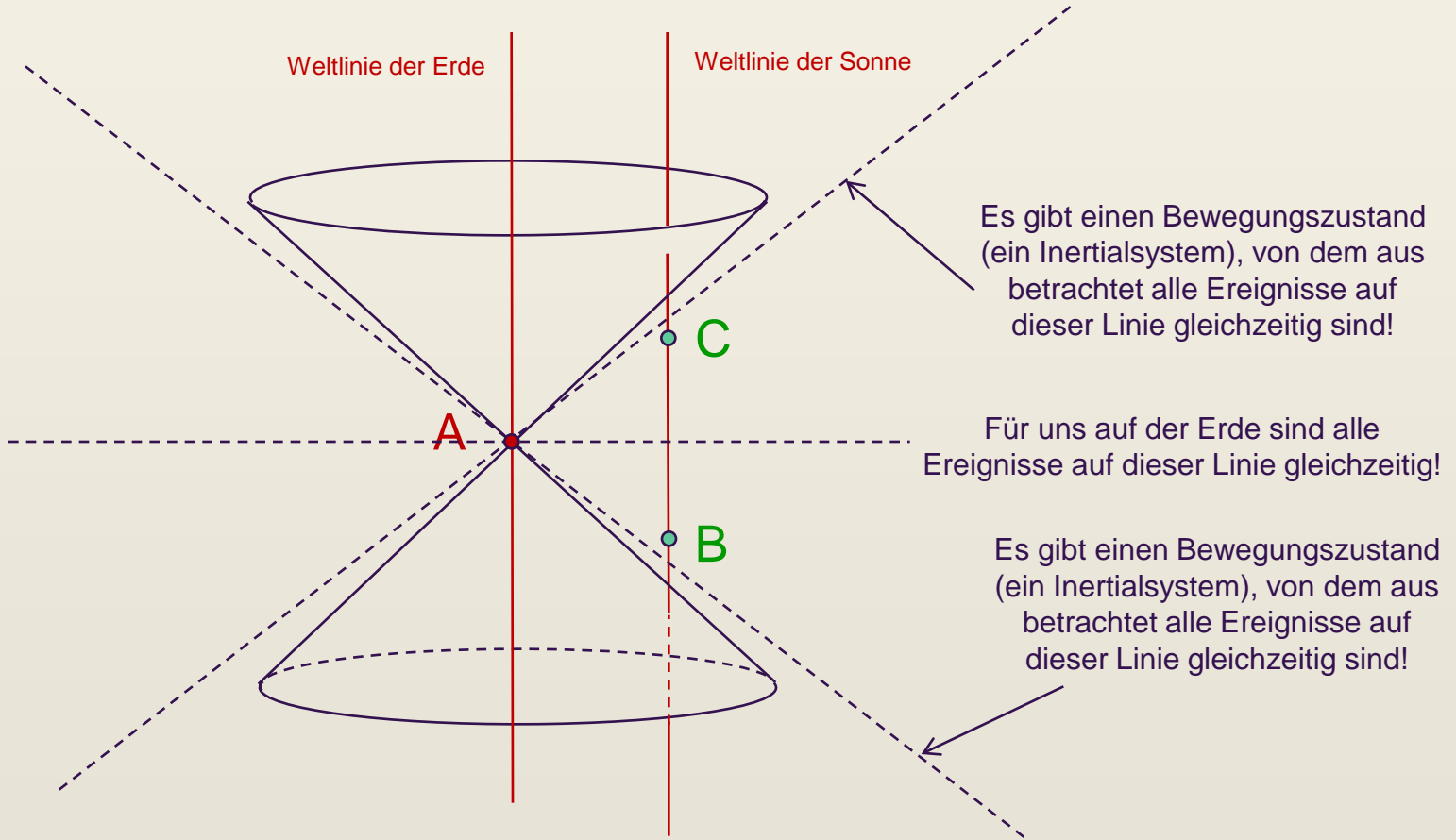
Kausalstruktur der (relativistischen) Raumzeit



Die Wandlung der Kausalstruktur



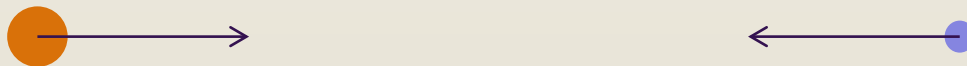
Die Wandlung der Kausalstruktur



Auf dem Weg zur gekrümmten Raumzeit

- Und die Gravitation?
Die Newtonsche Gravitationstheorie passt nicht mit der Speziellen Relativitätstheorie zusammen!

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



Überlichtschnelle Signal-Übertragung möglich!

Auf dem Weg zur gekrümmten Raumzeit

- **1908**
Albert Einstein entwickelt das Äquivalenzprinzip
<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/artAequivalenzprinzip/>
- **Krümmung und Raumzeit**
<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/EinsteinRechnet/Kruemmung.html>
- **1908 – 1915**
Einstein arbeitet am Entwurf einer Gravitationstheorie
→ Feldgleichungen („Materie krümmt die Raumzeit“),
Allgemeine Relativitätstheorie

Allgemeine Relativitätstheorie

- Kurz-Steckbrief:

- Materie krümmt die Raumzeit („Einsteinsche Feldgleichungen“)
- Körper „spüren“ diese Krümmung im Laufe ihrer Bewegung → Erklärung der Gravitations„kraft“
- Uhren in der Nähe schwerer Körper „gehen langsamer“ („gravitatives Zwillingsparadoxon“).
- Die Raumzeit ist keine fixe „Bühne“, sondern „dynamischer Mitspieler“.

Allgemeine Relativitätstheorie – weitere Quellen

- Uhren und Zeiten im Gravitationsfeld

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/artUhren/>

- Maßstäbe, Längen und Raumkrümmung im Gravitationsfeld

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/artMassstaebe/>

- Lichtablenkung

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Lichtablenkung/>

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/artLichtablenkung/>

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Lichtablenkung/gravitationslinse.html>

- Schwarze Löcher – wieso sind sie schwarz?

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Raumzeit/>

- Relativistische Korrekturen für GPS

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/rel.html>

- Strudel in der Raumzeit: der Thirring-Lense-Effekt

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Thirring-Lense/Flash/>

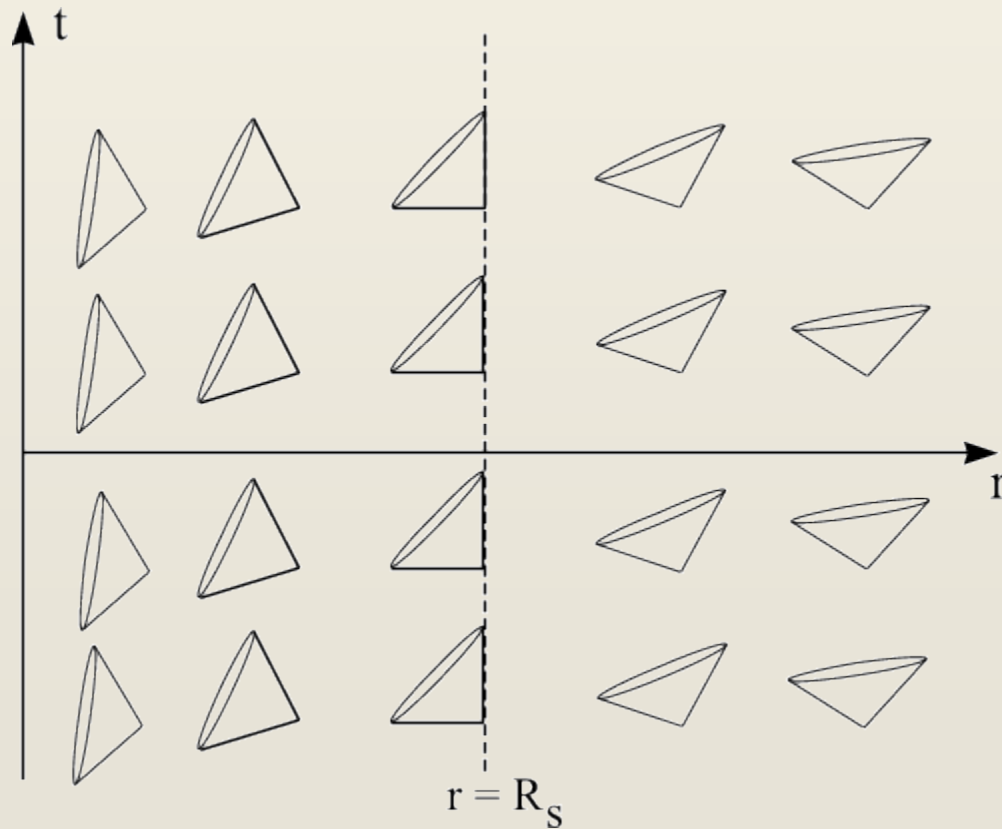
Raumzeit weit weg von schweren Massen

„Minkowski-Raumzeit“ (Spezielle Relativitätstheorie)



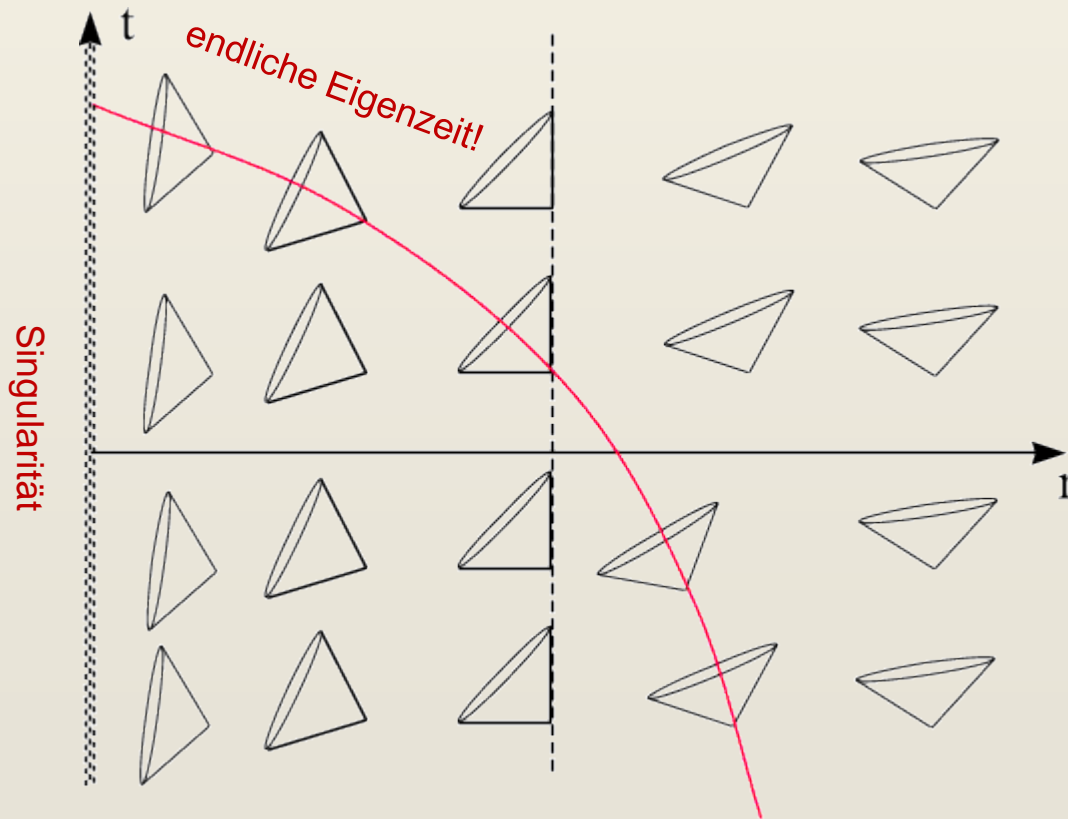
Raumzeit in der Nähe einer schweren Masse

Krümmung der Raumzeit: gekippte Lichtkegel

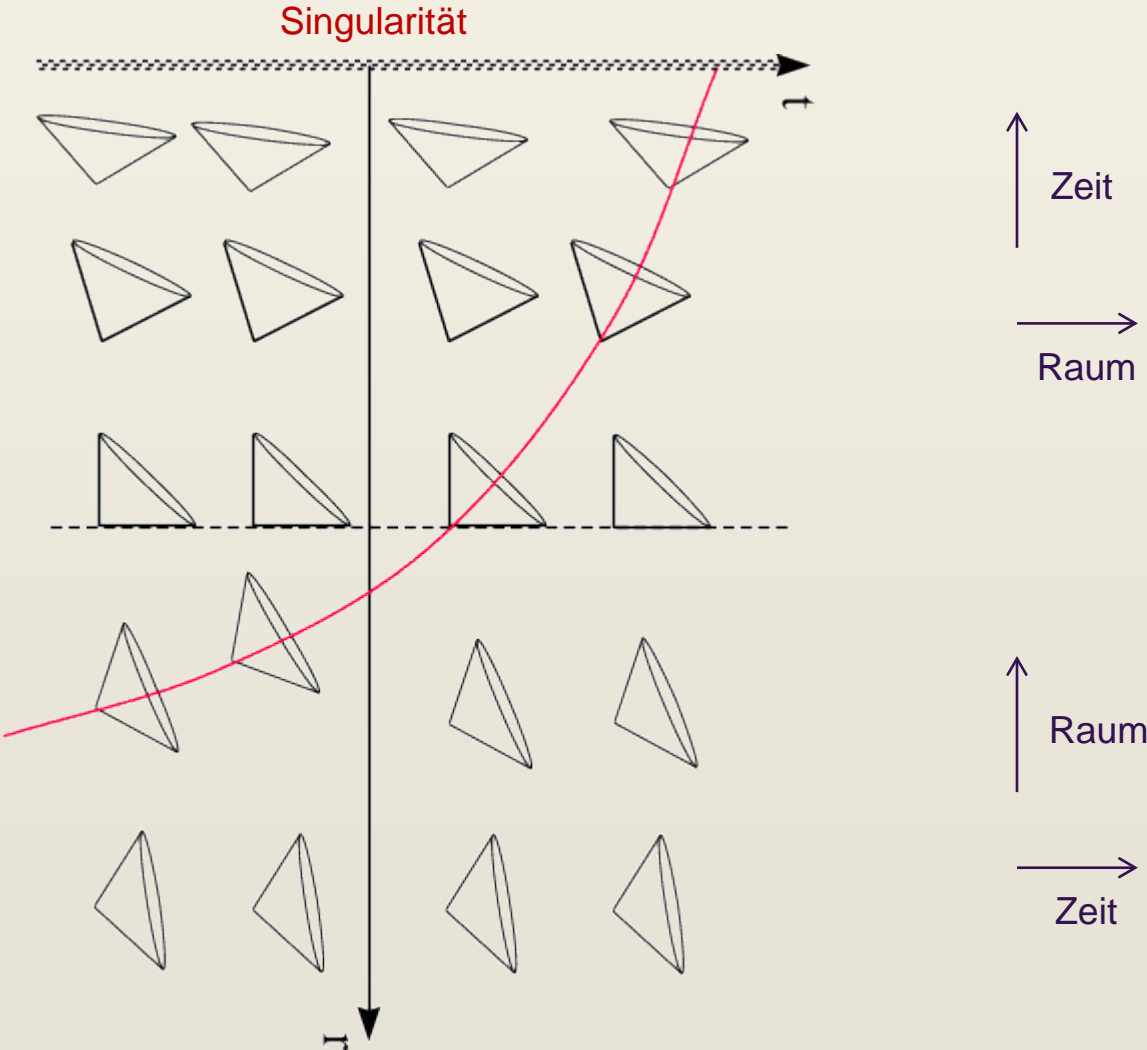


Raumzeit in der Nähe einer schweren Masse

Schwarzes Loch!

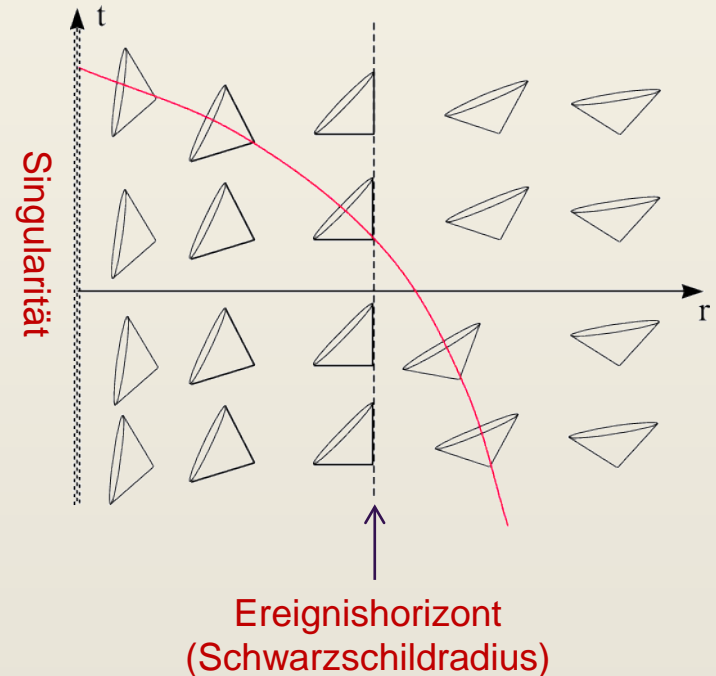


Raumzeit in der Nähe einer schweren Masse



Singularitäten der Raumzeit

- **1969** Roger Penrose
Vermutung: Singularitäten der Raumzeit sind immer von einem **Ereignishorizont** umgeben (*cosmic censorship*). Es gibt keine „nackten Singularitäten“.



- Offene Frage:
Bis heute ist nicht klar, ob die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (zusammen mit vernünftigen Bedingungen an die Materie) dies vorhersagen!

Die Raumzeit des Universums

- **1917** Albert Einstein: Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie waren nicht vereinbar mit einem **statischen** Universum. Einstein fügt eine „kosmologische Konstante“ Λ ein, die die Gravitation auf großen Längenskalen abstoßend macht.
- **1912 – 1929** Vesto Slipher, Edwin Hubble und George Lemaître: **Expansion des Universums**, Hubble-Gesetz. Das Universum ist **dynamisch**. Einstein streicht sein Λ aus der Theorie („meine größte Eselei“).
- Quanten- und Teilchenphysik: Die kosmologische Konstante Λ stellt die „Energiedichte des Vakuums“ dar. **Ist $\Lambda = 0$?**

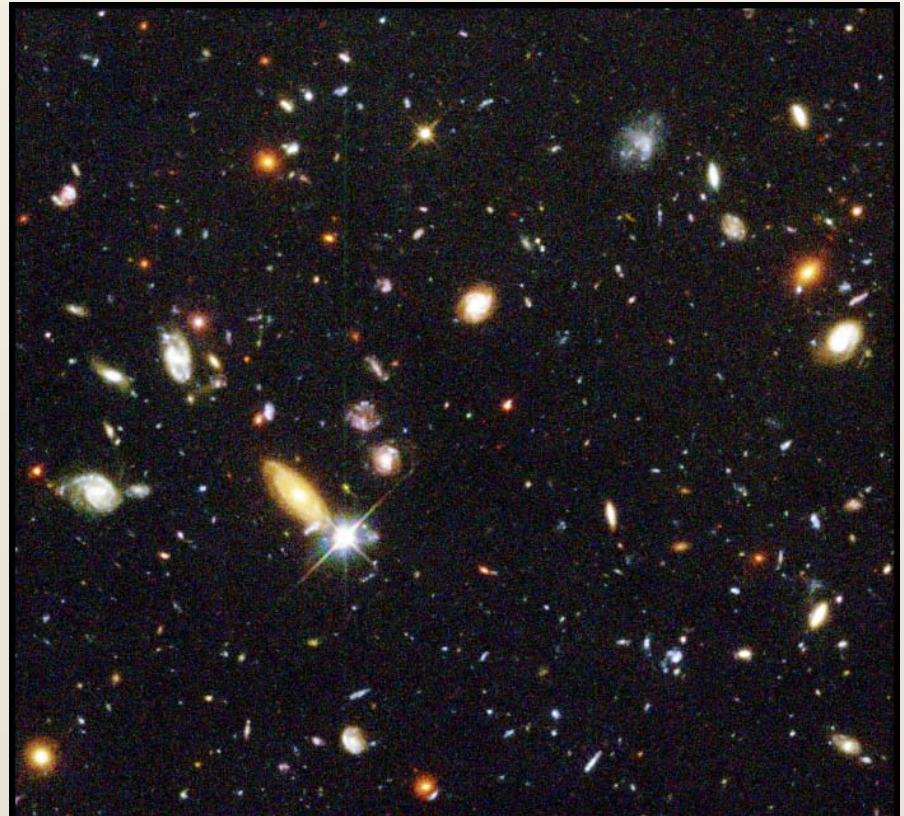
Die Raumzeit des Universums

- Bis **1998**: Das Universum expandiert **gebremst**. Es begann mit einem Urknall (und möglicherweise mit einer „inflationären Phase“ kurz danach. Seither wird die Expansion durch die anziehende Schwerkraft aller Massen im Universum gebremst.
- **1998** die große Überraschung: Das Universum expandiert **beschleunigt** (Nobelpreis 2011 für Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt und Adam G. Riess)! Auf großen Längenskalen wirkt die Gravitation offenbar doch abstoßend!

Die kosmologische Konstante Λ ist $\neq 0$. Das Vakuum besitzt eine nichtverschwindende Energiedichte!

Die Raumzeit des Universums

- Die **räumliche** Krümmung des Universum ist (fast) Null.
- Die Krümmung der **Raumzeit** des Universums ist gleichbedeutend mit seiner **Expansion!**
- Der Urknall – Wo? Wann? Was war „vorher“?



Kosmologie

- Die Expansion des Universums

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/artExpansion/>

- Hubble-Gesetz:

$$v_0 = H_0 D_0$$

↑
Hubble-Konstante (ca. 71 km/s/Mpc)

Kosmologie

- Die Expansion des Universums

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/artExpansion/>

- Hubble-Gesetz:

$$v_0 = H_0 D_0$$

für weit entfernte Galaxien *nicht* messbar

Hubble-Konstante (ca. 71 km/s/Mpc)

- Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation:
Beziehung zwischen

z ... Rotverschiebung des beobachteten Lichts

D ... Entfernung der Quelle zum Zeitpunkt der Aussendung des Lichts

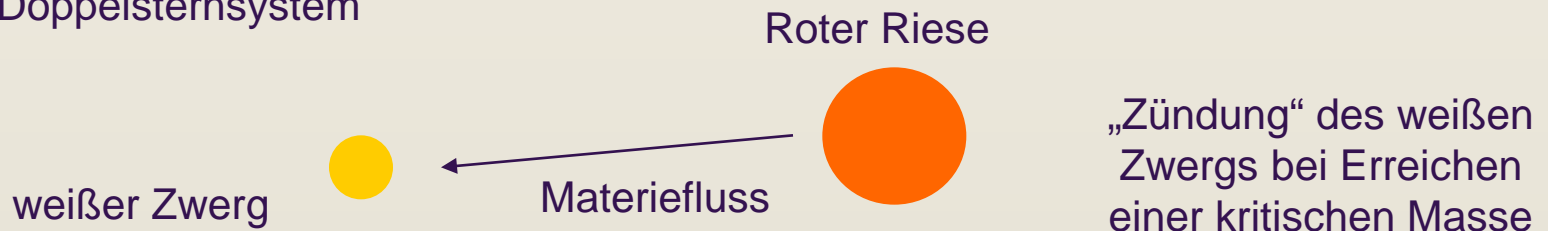
direkt messbar

indirekt messbar

Beobachtungen: Supernovae Ia als Standardkerzen

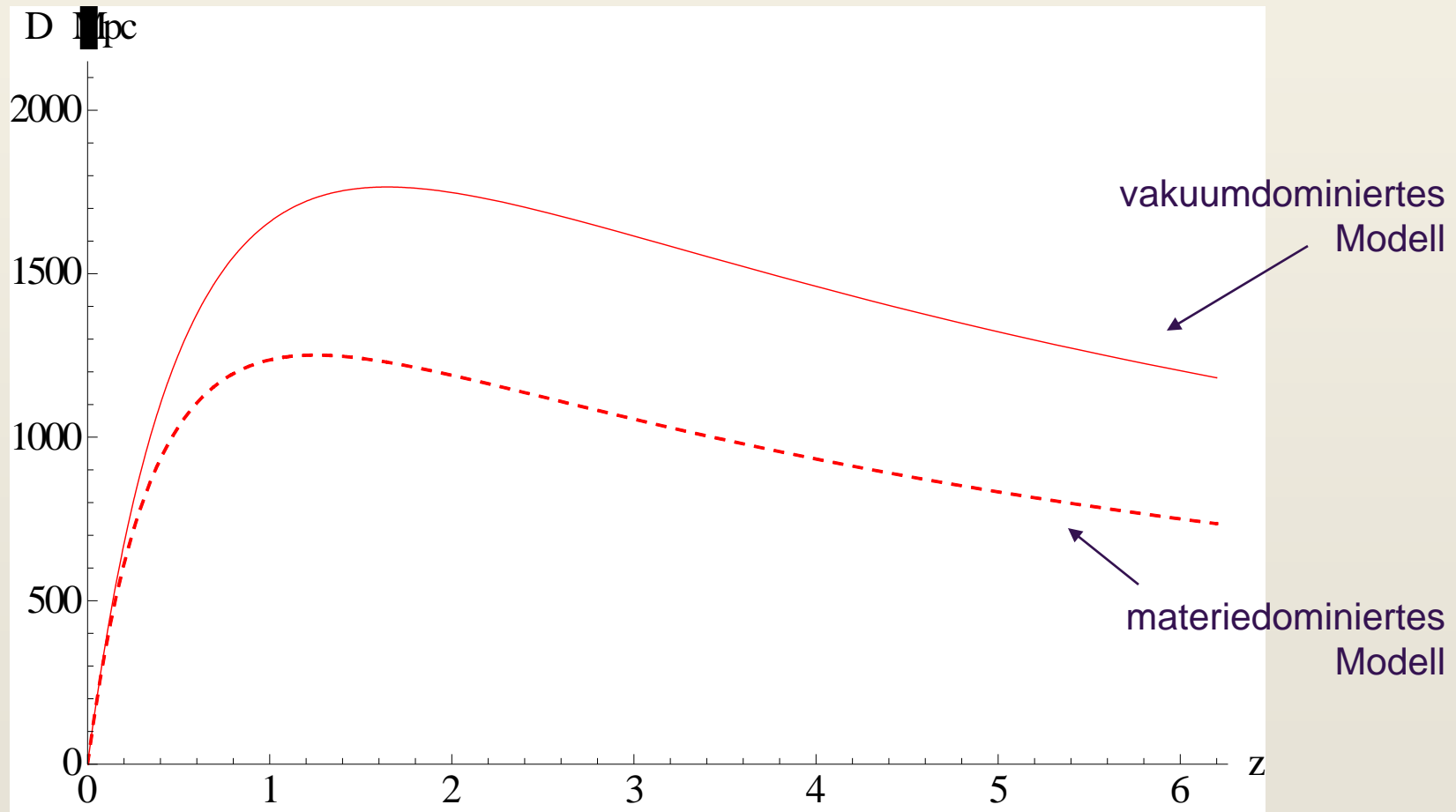
- Wie können sehr große Entfernungen gemessen werden?
- Supernova-Explosionen vom Typ Ia sind annähernd „Standardkerzen“, d.h. ihre absoluten Helligkeiten sind (ungefähr) gleich und (ungefähr) bekannt:

Doppelsternsystem

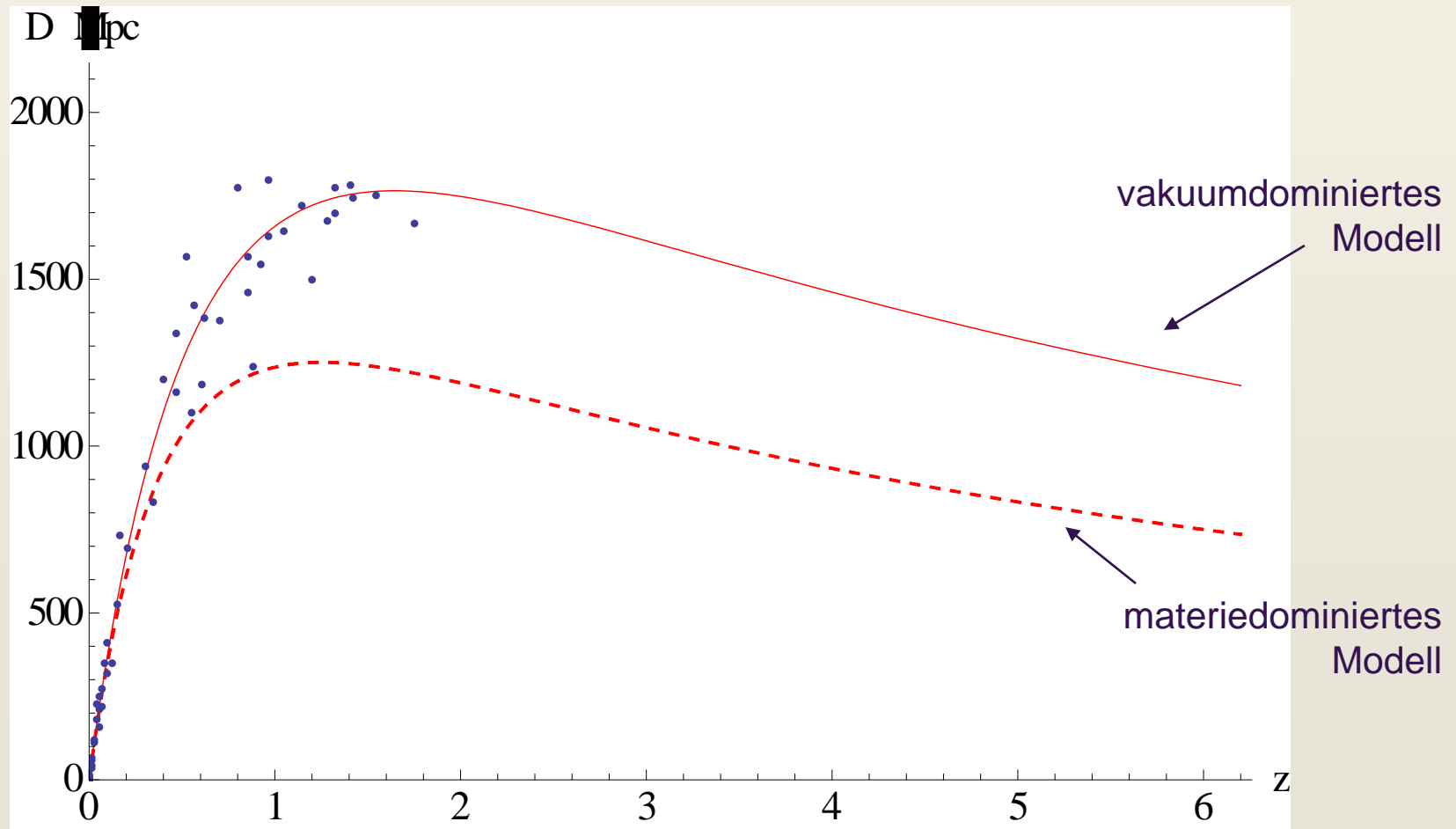


Aus der relativen (beobachteten) Helligkeit kann die Entfernung abgeschätzt werden.

Vorhersagen: Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation

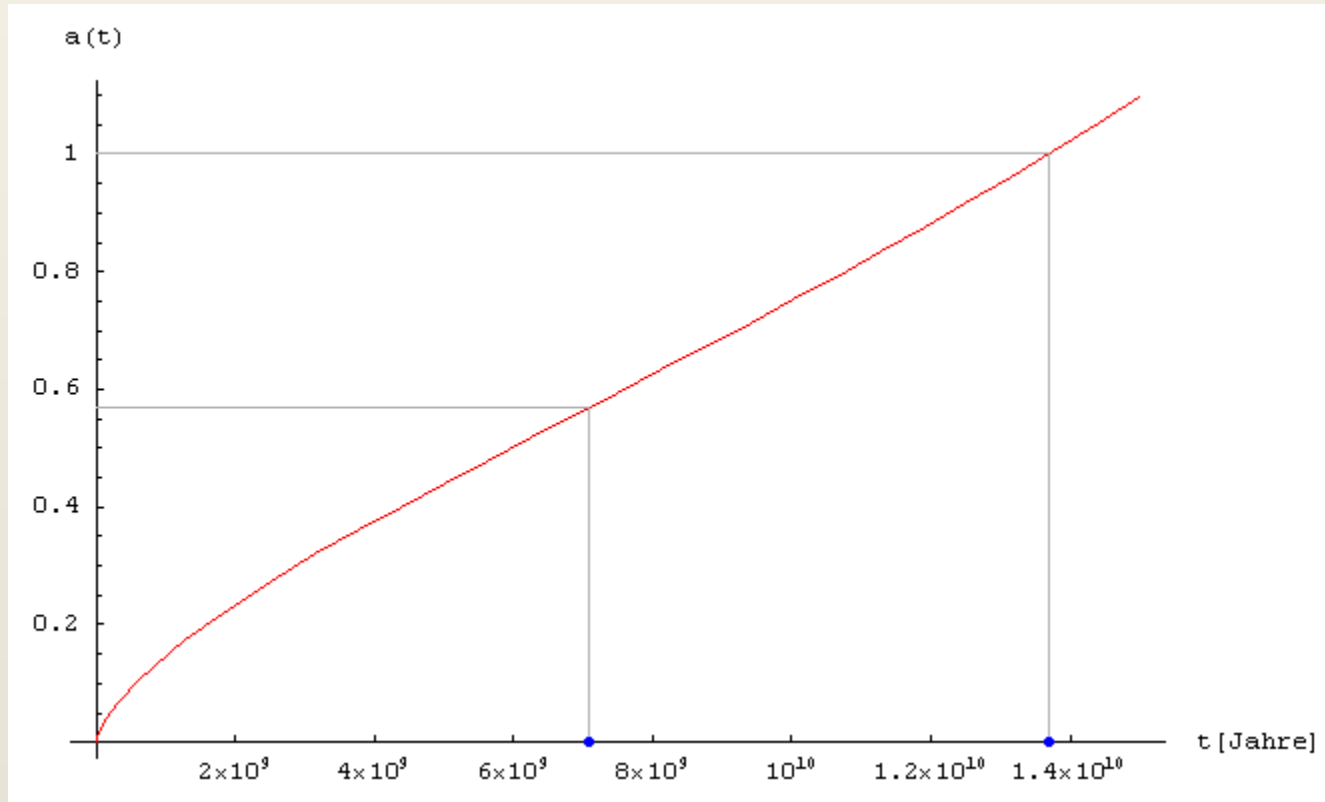


Vergleich mit Supernova-Daten (seit 1998)



Expansion der Universums – der gegenwärtige Stand

Skalenfaktor



Zeit

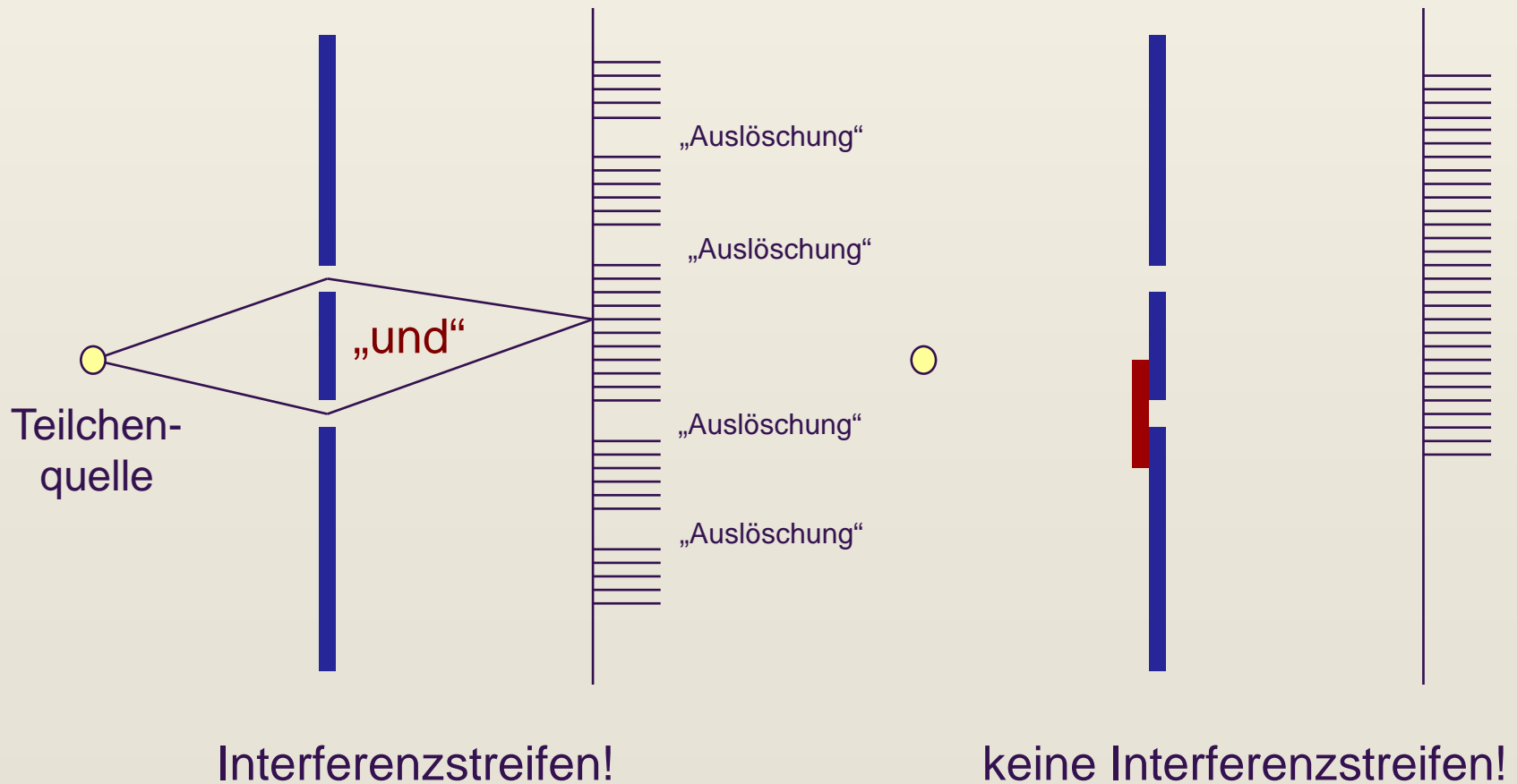
Quantentheorie und die Eigenzeit

- Quantenmechanisches Doppelspalt-Experiment



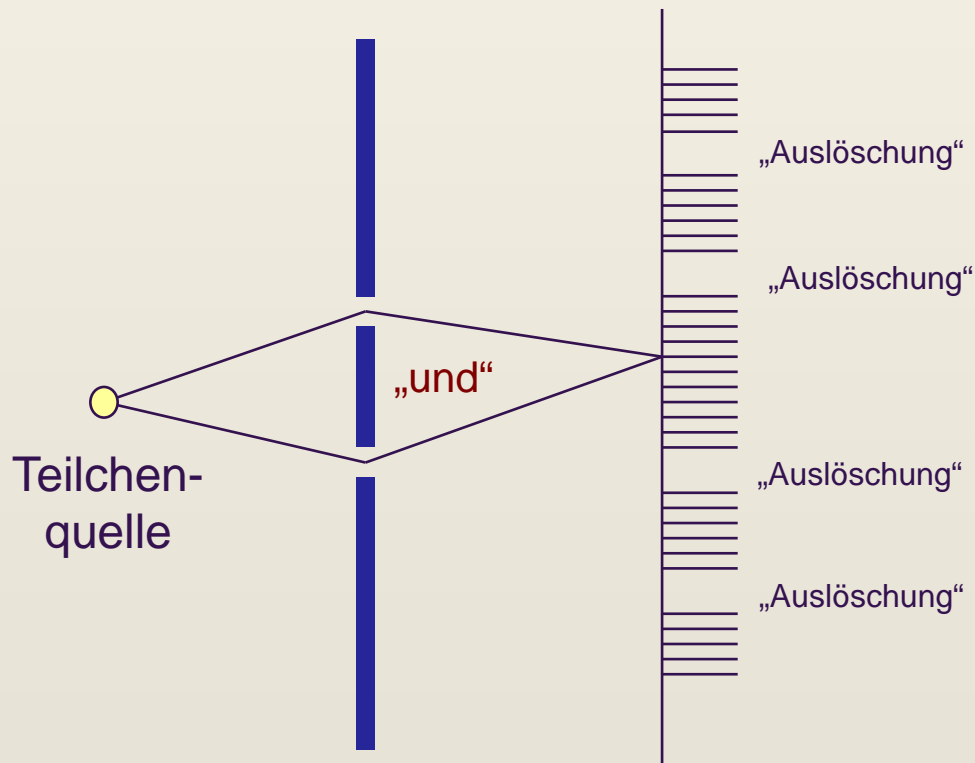
Quantentheorie und die Eigenzeit

- Quantenmechanisches Doppelspalt-Experiment

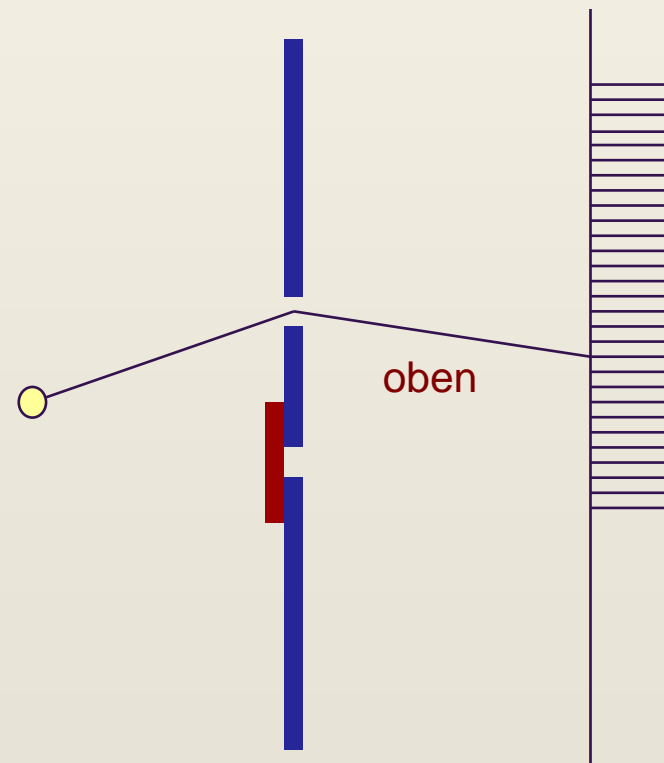


Quantentheorie und die Eigenzeit

- Quantenmechanisches Doppelspalt-Experiment



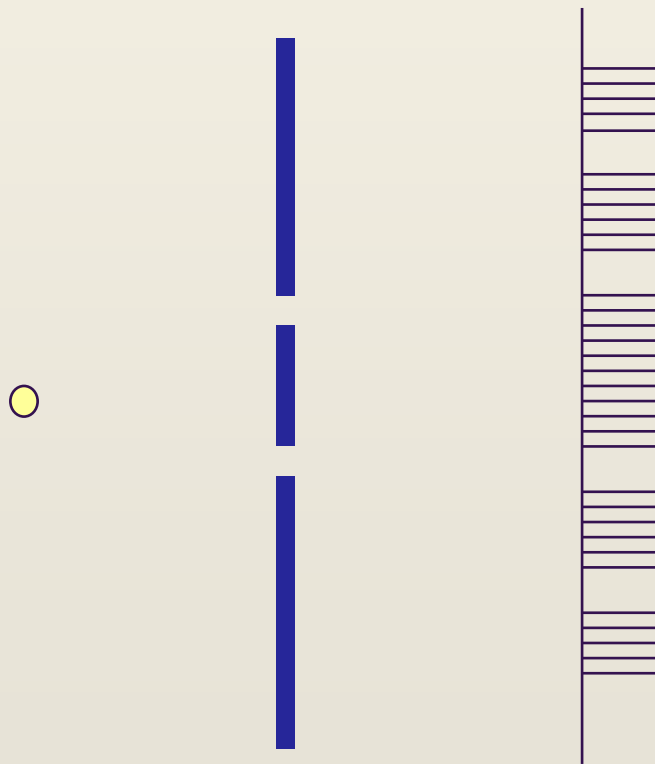
Interferenzstreifen!



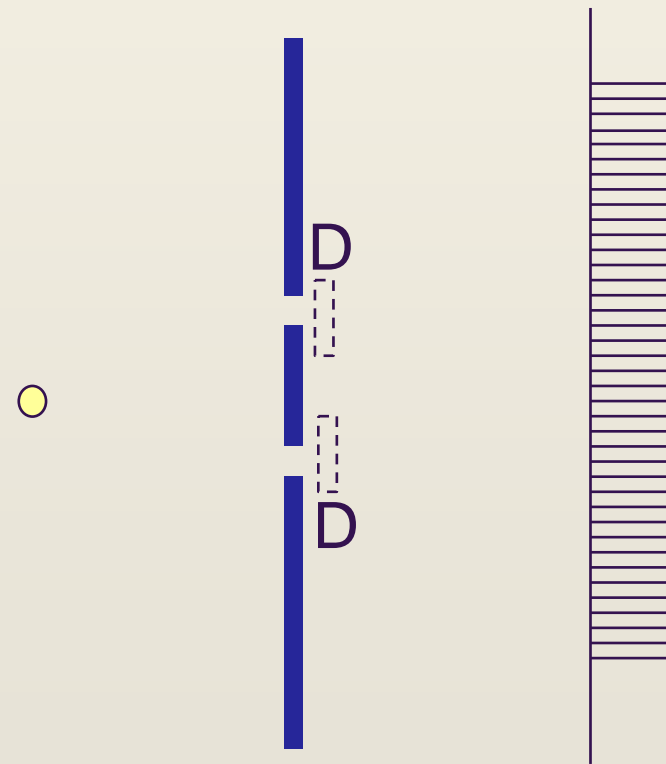
keine Interferenzstreifen!

Quantentheorie und die Eigenzeit

- Quantenmechanisches Doppelspalt-Experiment



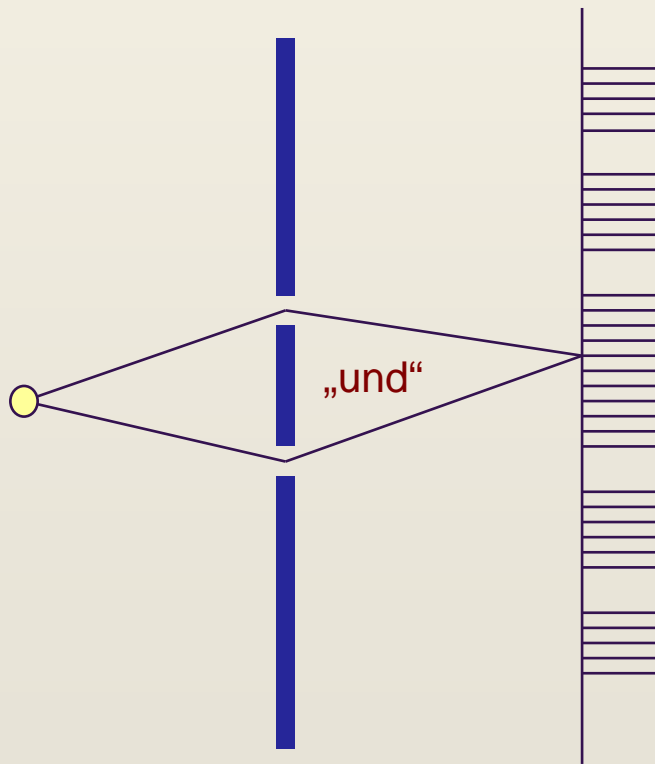
Interferenzstreifen!



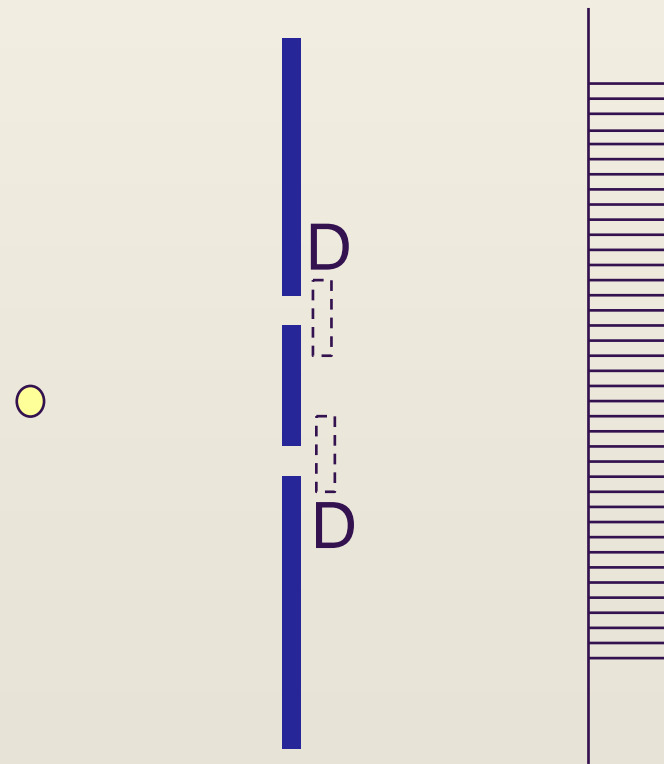
keine Interferenzstreifen!

Quantentheorie und die Eigenzeit

- Quantenmechanisches Doppelspalt-Experiment



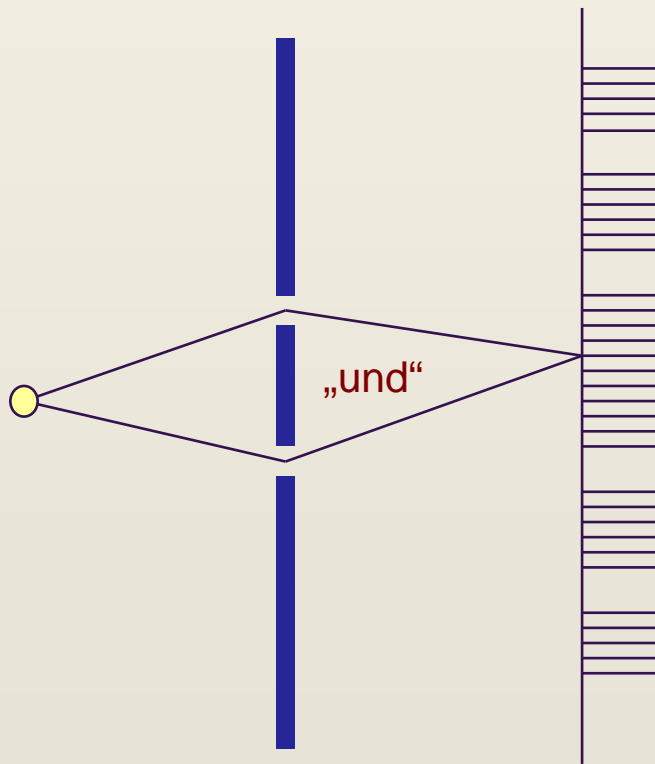
Interferenzstreifen!



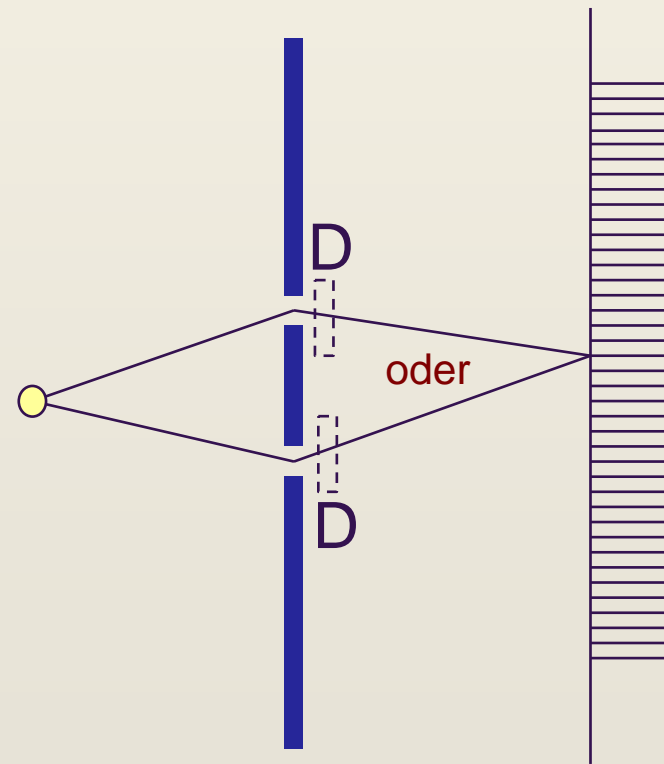
keine Interferenzstreifen!

Quantentheorie und die Eigenzeit

- Quantenmechanisches Doppelspalt-Experiment



Interferenzstreifen!



keine Interferenzstreifen!

Quantentheorie und die Eigenzeit

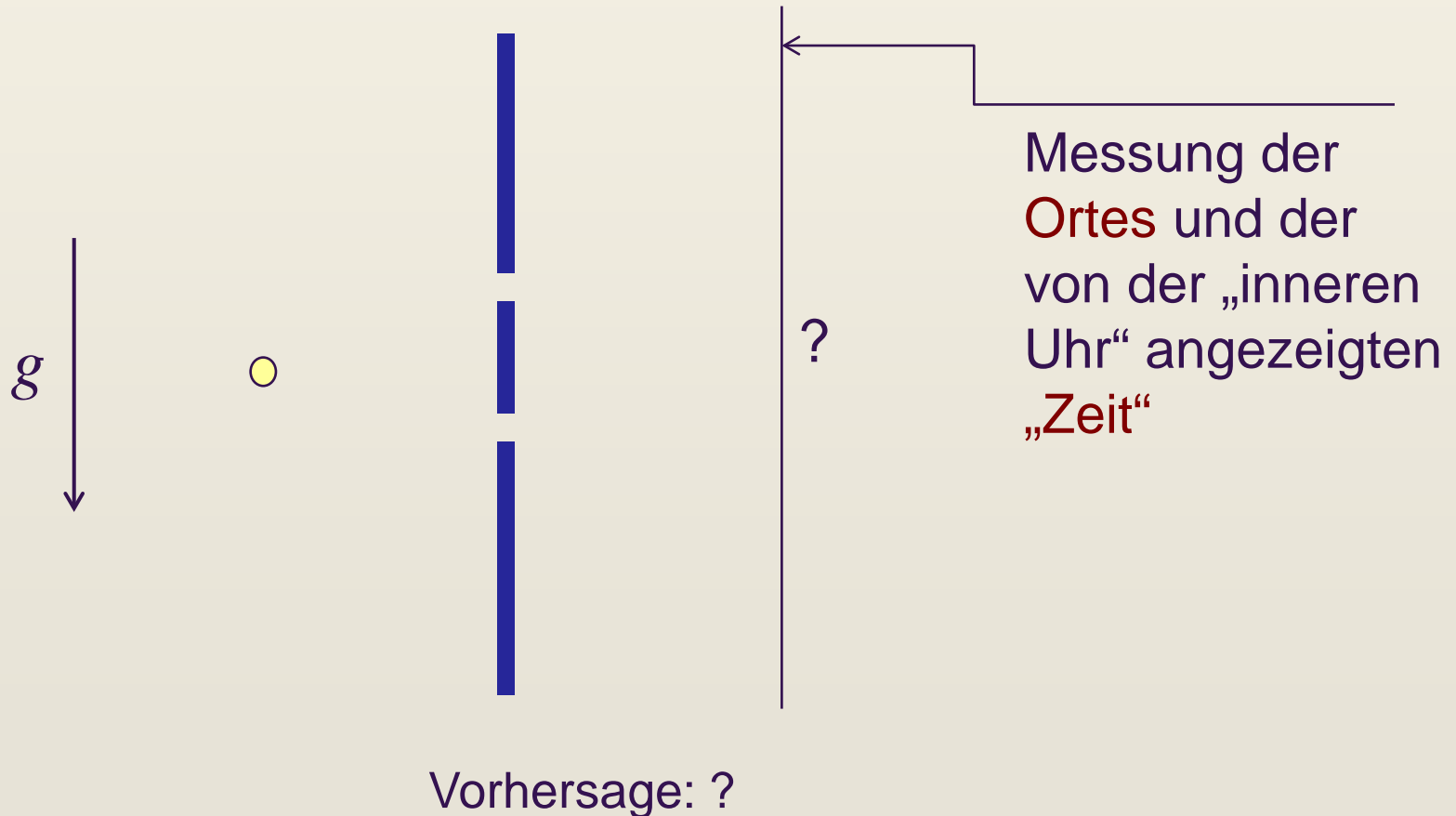
- Ein kürzlich vorgeschlagenes Experiment...



[http://physik.univie.ac.at/index.php?id=644&tx_ttnews\[tt_news\]=1631&tx_ttnews\[backPid\]=234&cHash=e7a3cd1dea](http://physik.univie.ac.at/index.php?id=644&tx_ttnews[tt_news]=1631&tx_ttnews[backPid]=234&cHash=e7a3cd1dea)

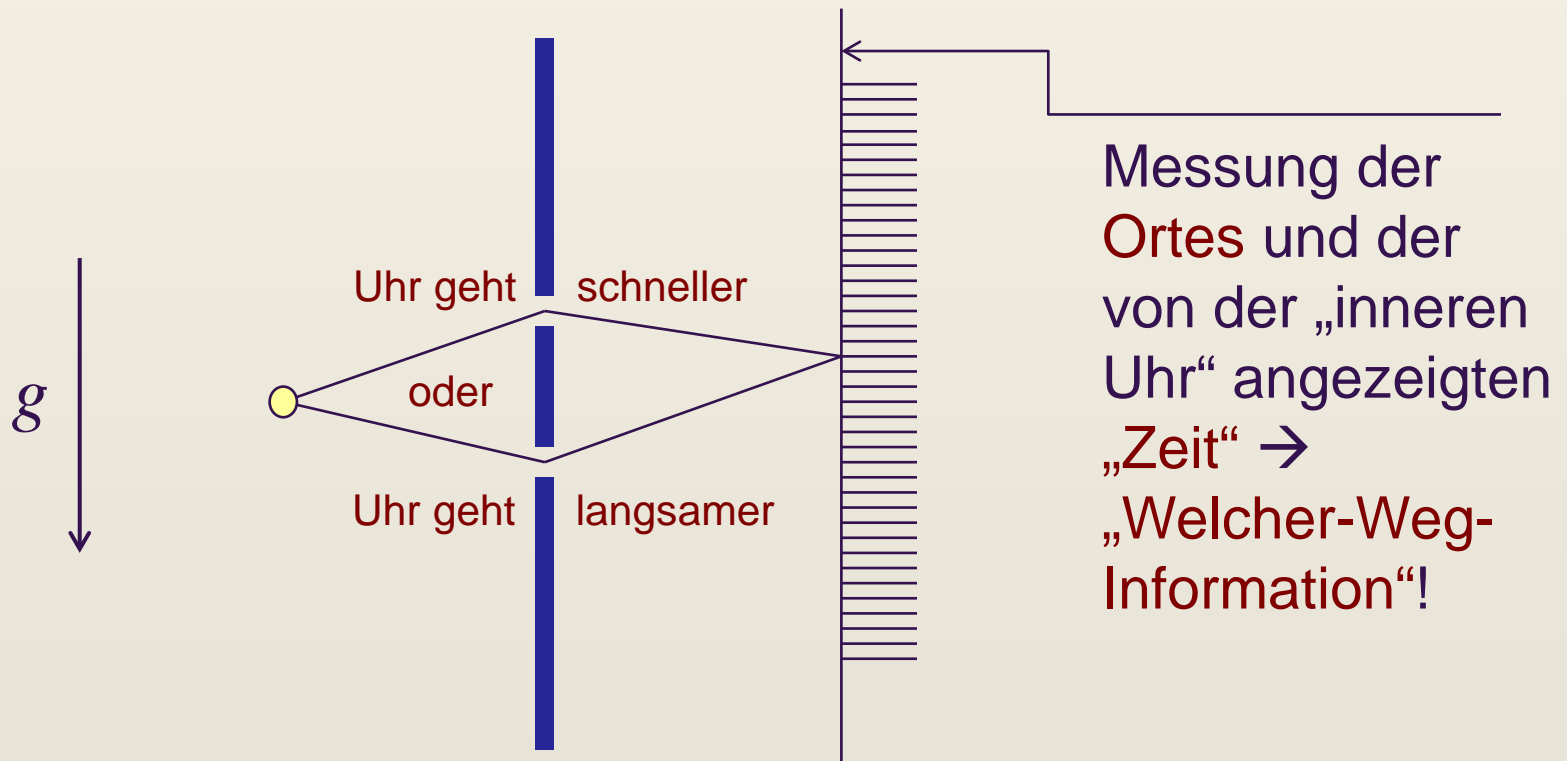
Quantentheorie und die Eigenzeit

Teilchen mit einer „inneren Uhr“ (z.B. Spin in Magnetfeld)



Quantentheorie und die Eigenzeit

Teilchen mit einer „inneren Uhr“ (z.B. Spin in Magnetfeld)



Vorhersage: keine Interferenzstreifen!

Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie

Quantengravitation...

... will die gekrümmte Raumzeit *selbst* (d.h. die Gravitation) quantentheoretisch beschreiben!

Aber: Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie passen nicht zusammen:

- In der allgemeinen Relativitätstheorie hängt die Bedeutung von „Zeit“ (u.a.) von der Verteilung der Materie ab.
 - Ein „Zeitpunkt“ **kann demnach nicht vorgegeben werden**, sofern die Verteilung der Materie nicht feststeht.
 - Aber diese steht in der Quantentheorie **vor** einer Messung nicht fest! Der Begriff „Zeitpunkt einer Messung des Gravitationsfeldes“ ist sinnlos (wäre aber für die Standard-Quantentheorie nötig)!
- konzeptuelle Unverträglichkeit der Zeitbegriffe („Problem der Zeit“)
... **bisher ungelöstes Problem!**

Danke...

... für Ihre Aufmerksamkeit!

Diese Präsentation finden Sie im Web unter

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/vor100Jahren/>