

# 100 Jahre Zwillingsparadoxon

Wie real sind die Effekte der Speziellen Relativitätstheorie?

Franz Embacher

Fakultät für Physik  
Universität Wien



Vortrag im Rahmen von *University Meets Public*  
VHS Meidling, Wien, 10. 10. 2011

# Inhalt

---

- **Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie**  
James Clerk Maxwell, Hendrik Antoon Lorentz, Henri Poincaré
  - **Spezielle Relativitätstheorie**  
Albert Einstein, Hermann Minkowski
  - **Zwillingsparadoxon**  
Paul Langevin, Max von Laue
- Abspann
- Alice geht auf Reisen...**

## Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

- **1864**  
James Clark 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

---

- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts (im Medium „Äther“) müsste von der Bewegung des Beobachters und der Richtung der Ausbreitung abhängen!

Analogie:  
Geschwindigkeit  
von Wasserwellen!



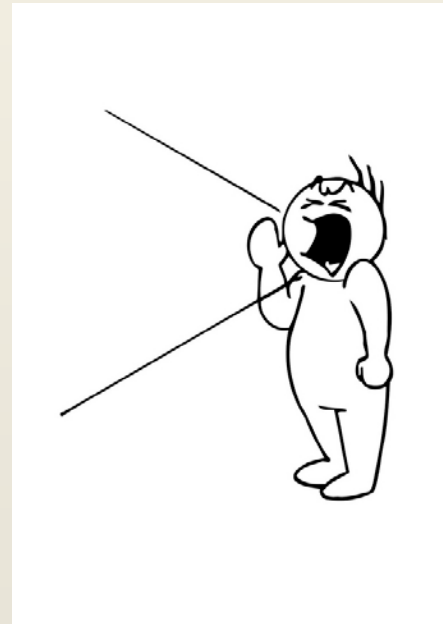




# Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

- Analogie: Schallgeschwindigkeit

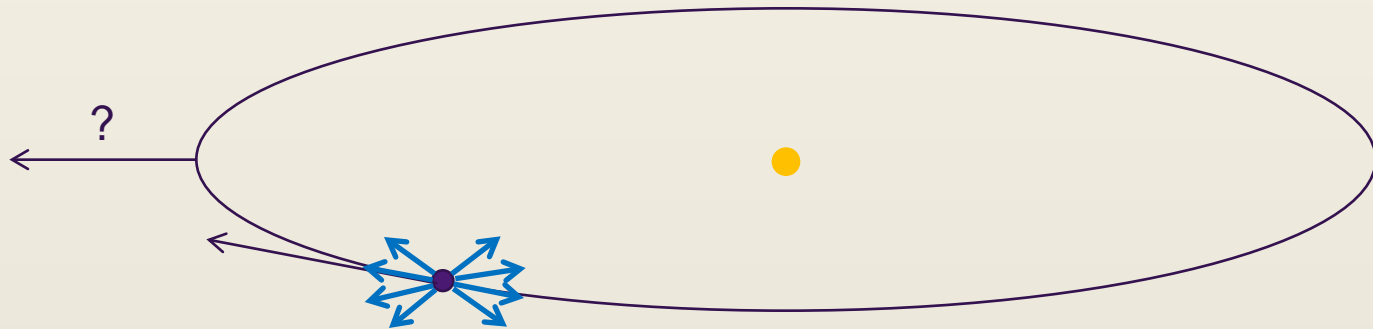


<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Einstein/Fahrtwind/>

# Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

- ...und analog müsste es sich mit dem Licht verhalten!



Lichtgeschwindigkeit  
abhängig von der  
Ausbreitungsrichtung...

... eventuell abhängig von  
der Jahreszeit





# Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

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



Michelson-  
Interferometer  
Potsdam 1881  
Cleveland 1887

...

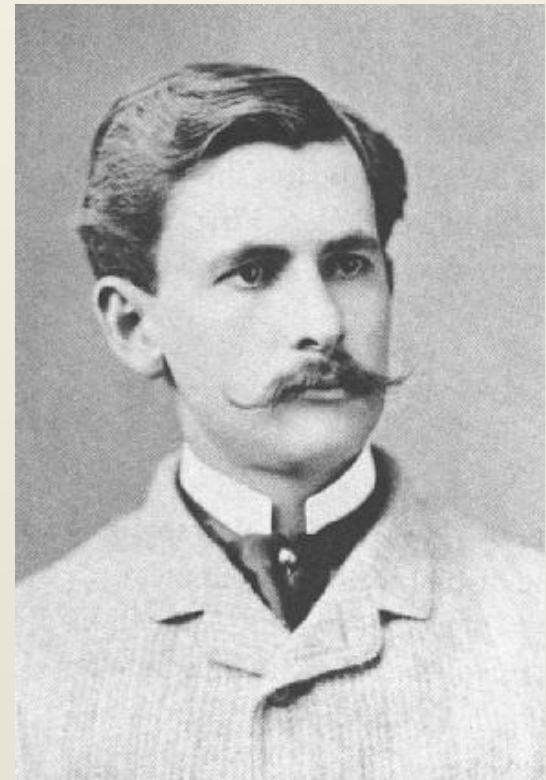
## Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

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

**Überraschung:** Es konnte **kein** Unterschied in den Geschwindigkeiten des Lichts in **verschiedene Richtungen** nachgewiesen werden!

→ Kein „Ätherwind“!  
Keine Bewegung der Erde relativ zum Äther nachgewiesen!



## Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

- Wie war das möglich?
- Wird der Äther vollständig **mitgeführt** (**Stokes**)?  
Oder nur teilweise, mit einem kleinen  
**„Mitführungskoeffizienten“** (**Fresnel**)?
- Was für eine Art von „Stoff“ ist der Äther?
- Mitführung des Äthers nur mit der Erde im Großen?  
Oder mit jedem Objekt, also auch mit jeder einzelnen  
Lichtquelle? Wie verhält sich Licht in einer  
strömenden Flüssigkeit?  
**Fizeau-Experiment** (1851) → verringerte  
Lichtgeschwindigkeit → teilweise Mitführung?

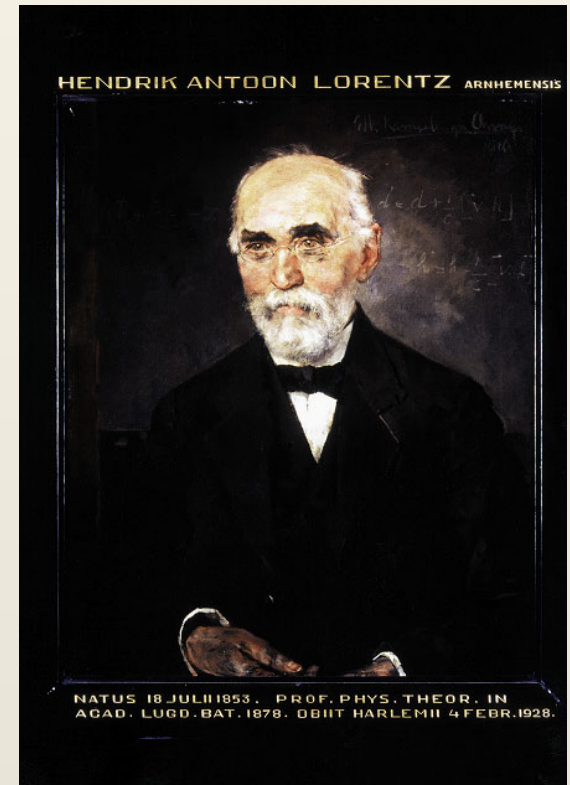
# Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

- 1892 – 1904

Hendrik Antoon Lorentz:  
Der Äther verhält sich stets so,  
dass er uns falsche („scheinbare“)  
Längen und Zeiten vorgaukelt  
und damit die absolute Bewegung  
der Erde „versteckt“!

**Idee:** Mechanische Prozesse  
auf elektromagnetische  
zurückführen (statt wie bis  
dahin umgekehrt)! Keine Aussage über die  
mechanische Natur des Äthers!



# Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

- Hendrik Antoon Lorentz:  
→ Lorentz-Transformation, „neue Mechanik“.

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad x' = \frac{x - v t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (\text{heutige Form})$$

- „Längenkontraktion“ und „Zeitdilatation“ als Prozesse, die die „absolute Bewegung“ (d.h. die Bewegung relativ zum Äther) kompensieren.
- Unterscheidung zwischen „wahren“ und „scheinbaren“ Längen und Zeiten.

## Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

- 1895 – 1905

Henri Poincaré postuliert die „völlige Unmöglichkeit der Entdeckung einer absoluten Bewegung“ (→ „Postulat der Relativität“) und die Unüberschreitbarkeit der Lichtgeschwindigkeit für alle Beobachter.

Er gelangt über Ansätze nicht hinaus und verfolgt diese Gedankengänge nicht weiter.



# Vorläufer der Speziellen Relativitätstheorie

---

Bis zum Jahr 1905:

- Relativitätsprinzip („Gleichberechtigung aller Inertialsysteme“) → **nur eine Fiktion!**
- Relativität der Gleichzeitigkeit → **nur eine Fiktion!**
- Zeitdehnung und Längenkontraktion, Lorentz-Transformation, *wahre* und *scheinbare* Längen und Zeiten → **nur Fiktionen!**
- Abhängigkeit der Elektronenmasse von der Geschwindigkeit → **nur eine Fiktion!**
- **Folge dieser Fiktionen:** Scheinbare Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für alle Beobachter!



# Spezielle Relativitätstheorie – die radikale Lösung

---

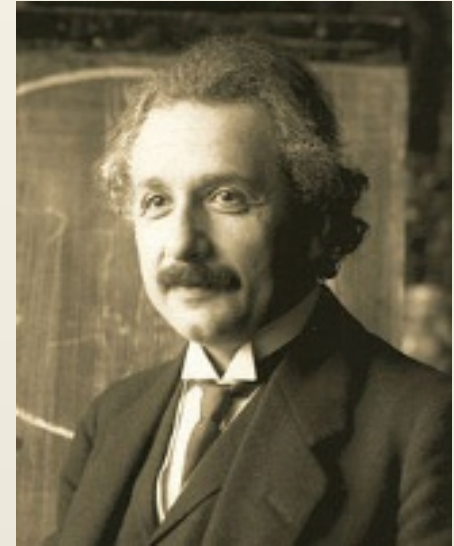
- 1905

Albert Einstein:

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





# Spezielle Relativitätstheorie

---

- 1905
  - Spezielle Relativitätstheorie
    - **Gemessene** Zeiten und Längen hängen vom Beobachter (Inertialsystem) ab. Die Umrechnung zwischen zwei Inertialsystemen wird mit Hilfe der Lorentzschen Formeln bewerkstelligt.
    - Auch was „gleichzeitig“ ist, hängt vom Inertialsystem ab.
    - Energie besitzt Trägheit ( $E = mc^2$ ).

# Spezielle 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/>

## 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 und seine konzeptuellen Ansichten über Raum und Zeit setzten sich nicht auf Anhieb durch.

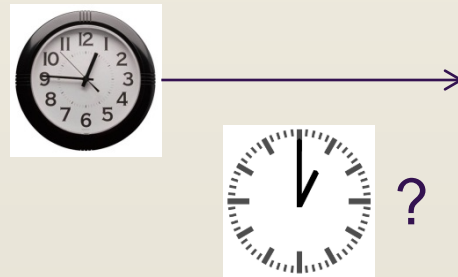
- Wie kann „die Zeit“ für eine Uhr schneller vergehen als für eine andere *und umgekehrt*? Könnte es sich um einen scheinbaren Effekt handeln?
- Betreffen die relativistischen Effekte nur „scheinbare“ Längen und Zeiten, die von „wahren“ Längen und Zeiten zu unterscheiden sind?

# Wie sind die relativistischen Effekte zu deuten?

---

Problem:

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

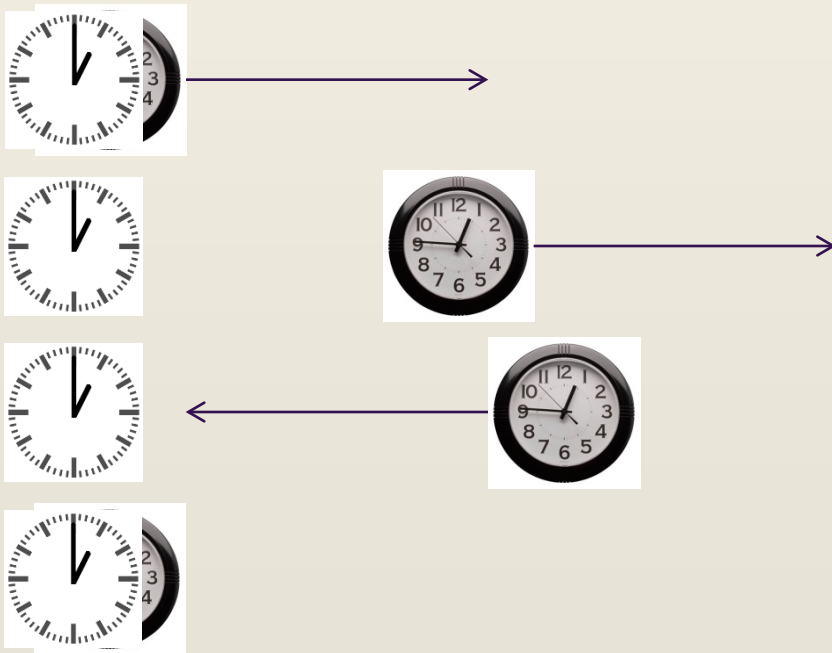


Das ist auch eine große Herausforderung für unsere Vorstellung!

# Vor hundert Jahren...

---

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



## Vor hundert Jahren...

---

- **Zwillingsparadoxon**: Zwei Uhren werden getrennt, bewegen sich auf verschiedene 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 Gangunterschied ist Handfestes!

- Paul Langevin sah als Grund für das „Paradoxon“ die Beschleunigung einer Uhr (beim Umkehren) an.  
→ Für ihn ein Hinweis auf eine absolute Bewegung in einem Äther.

# Die moderne Deutung

---

- 1913  
Max von Laue deutet das **Zwillingsparadoxon** anders:
- Die Beschleunigung der einen Uhr beim Umdrehen kann beliebig klein gemacht werden.  
→ Das **Ausmaß** des Effekts wird **nicht** durch den Wert der Beschleunigung jener Uhr, die umdreht, bestimmt!
- Wichtiger ist: *eine* Uhr verbleibt in einem „**Inertialsystem**“, die *andere* nicht!

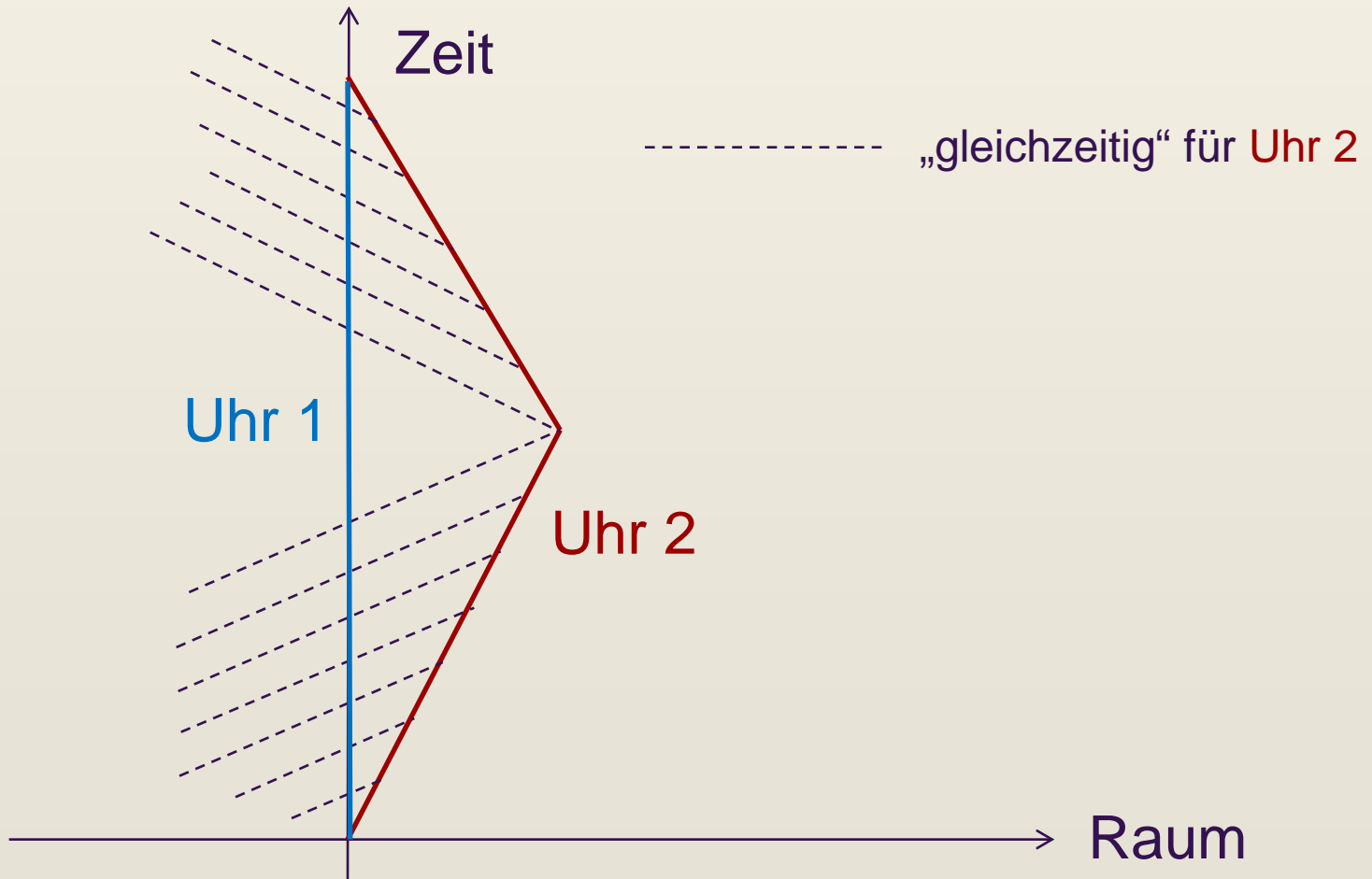




# Die moderne Deutung

---

Grafische Darstellung der Gleichzeitigkeitsverhältnisse:



## Wie sind die relativistischen Effekte zu deuten?

---

Die heutige Sichtweise:

- Das Zwillingsparadoxon ist nicht paradox, sondern illustriert sehr schön, dass die von der Speziellen Relativitätstheorie vorhergesagten Effekte *real* sind.
- Die Unterscheidung zwischen messbaren „scheinbaren“ Längen und Zeiten und unmessbaren „wahren“ Längen und Zeiten ist unphysikalisch, und es besteht keine Notwendigkeit dafür!
- Es ist schwierig, sich von der Idee des „Zeitflusses“ zu lösen, aber dennoch gilt:

**Was ist Zeit? Zeit ist, was eine Uhr misst!**

Seither gilt...

---

## **Relativistische Effekte aus heutiger Sicht**

(aus: Relativitätstheorie für Kids, 2009)

# Alice geht auf Reisen

Ein Gedankenexperiment:

Charly



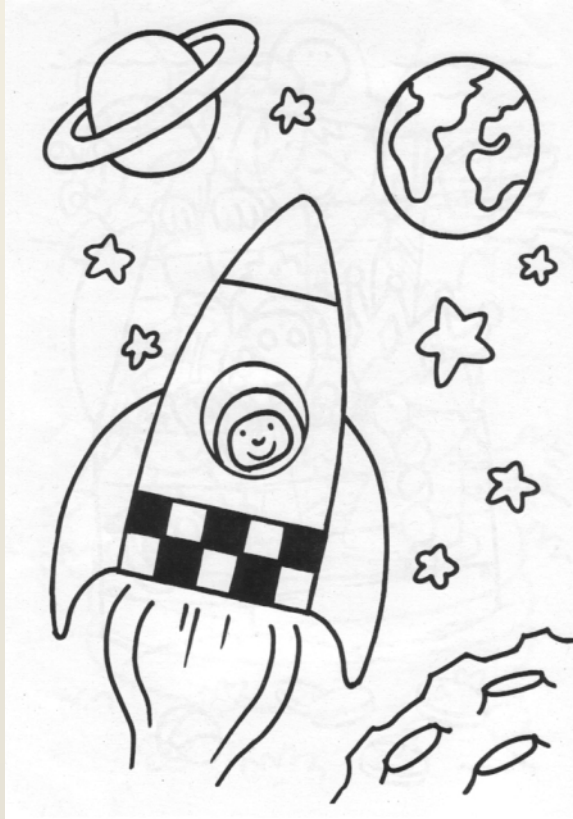
Alice

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

# Alice geht auf Reisen

---

...und steigt in ihr Raumschiff.



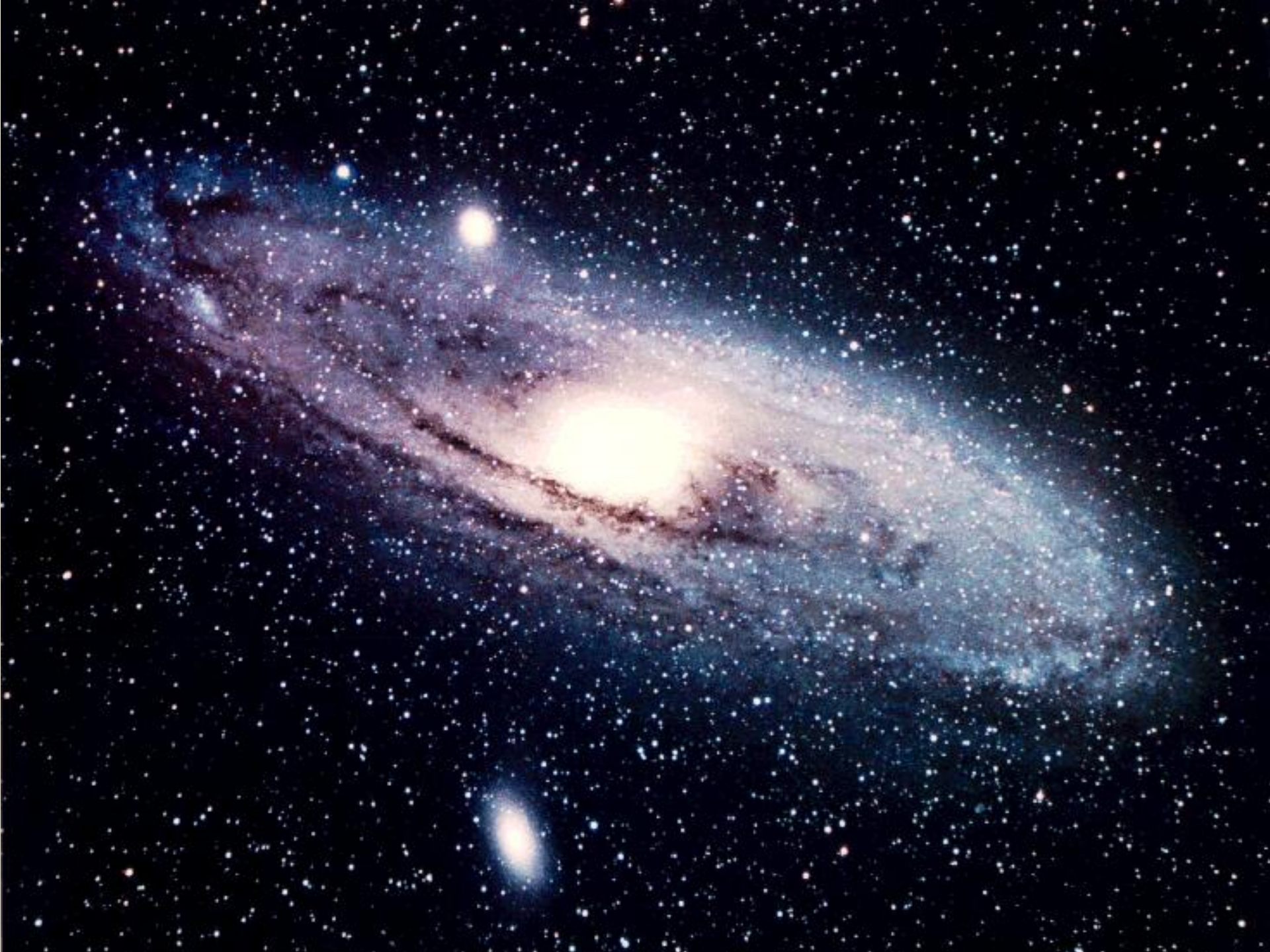
Begleiten wir sie auf ihrer Reise...



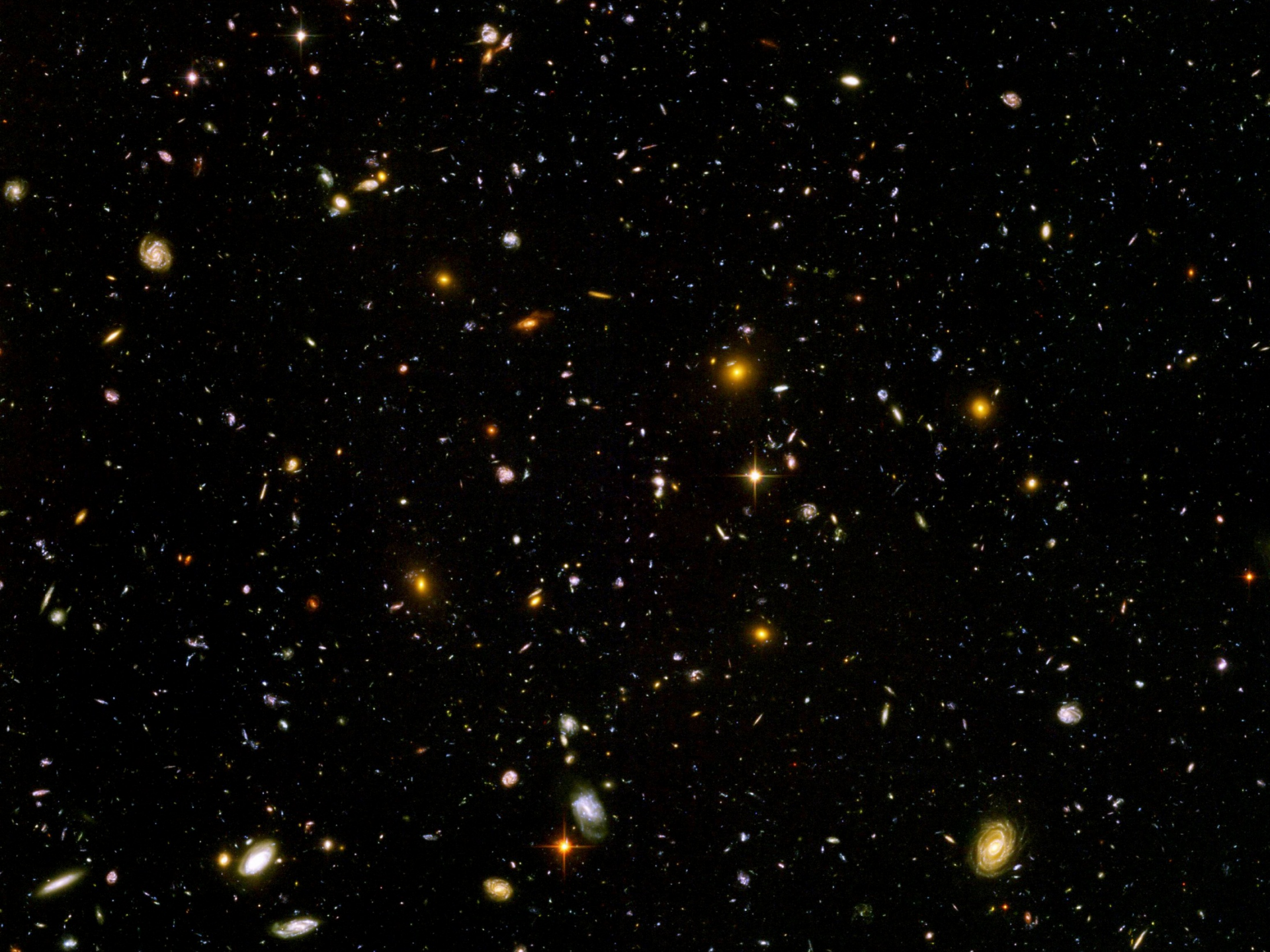








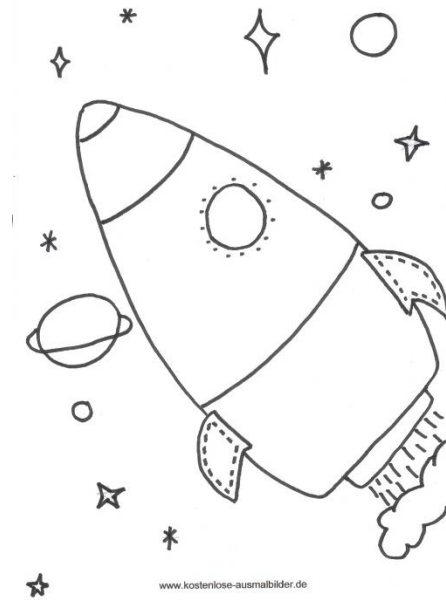




# Alice kehrt zurück

---

Alice kehrt von ihrer Reise zur Erde zurück...





# Alice kehrt zurück

---

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



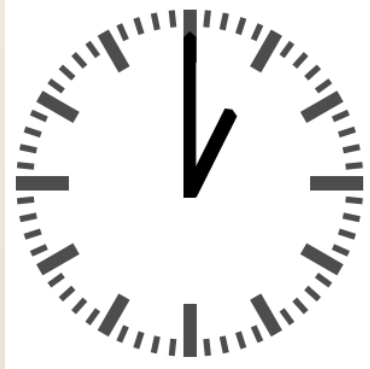
Charly

Das **Zwillingsparadoxon!**

# Relativistische Effekte sind real

---

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



Uhr von Charly

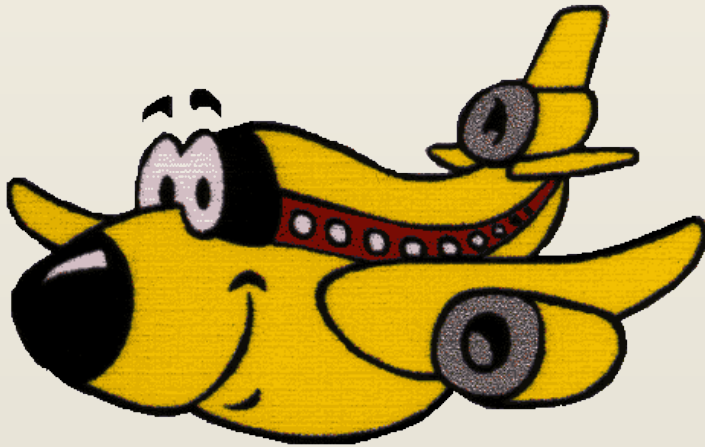


Uhr von Alice

# Relativistische Effekte sind real

---

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



langsam



schnell



ganz  
schnell

Danke...

---

... für Ihre Aufmerksamkeit!

Diese Präsentation finden Sie im Web unter

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/UMP2011/>