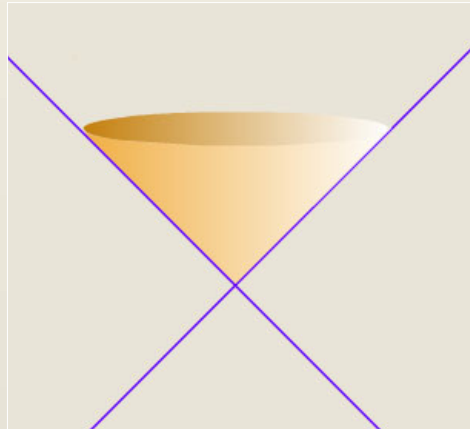
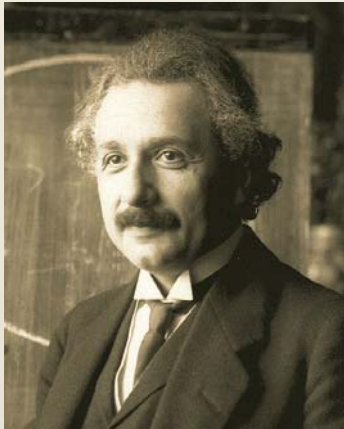


# Raum, Zeit und Raumzeit

Franz Embacher

Fakultät für Physik  
Universität Wien



Vortrag am GRG 17 Parhamerplatz, Wien  
21. 9. 2009

# Heute vor 101 Jahren...

---

21. September 1908:

80. Naturforscher-Versammlung in der Städtischen  
Handels-Hochschule zu Cöln (Gesellschaft  
Deutscher Naturforscher und Ärzte)

Hermann Minkowski hält einen Vortrag mit dem Titel  
„Raum und Zeit“

[http://de.wikisource.org/wiki/Raum\\_und\\_Zeit\\_\(Minkowski\)](http://de.wikisource.org/wiki/Raum_und_Zeit_(Minkowski))

„Von Stund´ an...“

Heute vor 101 Jahren...

---

„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!



## Betrachtungen zum Raum...

---

Versuchen wir es mal so:

„Von Stund´ an sollen die x-Koordinate,  
die y-Koordinate und die z-Koordinate völlig zu  
Schatten herabsinken und nur noch eine Art  
Union der drei soll Selbständigkeit bewahren.“

der Raum!

# Hermann Minkowski 1908

---

Raum und Zeit sind „lediglich“ die Koordinaten  
von **fundamentaleren Größen!**

↑  
**Ereignisse**

	Raum	Raumzeit
besteht aus:	Punkten	Ereignissen
Koordinaten:	$x, y, z$	<b>t</b> , $x, y, z$

↑  
**bemerkenswert!**

# Albert Einstein 1905: Spezielle Relativitätstheorie

---

- Voraussetzung: Ätherdriftexperimente 1881 (Michelson, Morley,...)

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

- 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/>

# Minkowski und danach: die Raumzeit und ihre Geometrie

---

- Raumzeit und Raumzeit-Geometrie

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

- Lorentztransformation: Koordinatenwechsel in der Raumzeit

<http://www.mathe-online.at/galerie/struct/struct.html#lorentz>

- Penrose-Diagramm: eine kompakte Darstellung der Raumzeit

<http://www.mathe-online.at/galerie/struct/struct.html#PenroseDiagramm>

- Geometrische Deutung der Geschwindigkeitsaddition (eine Überraschung)

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

# 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
- **1915**  
David Hilbert: Die Raumzeit und das Prinzip der kleinsten Wirkung  
<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/EinsteinRechnet/PrinzipDerKleinstenWirkung.html>



# Allgemeine Relativitätstheorie

---

- 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>

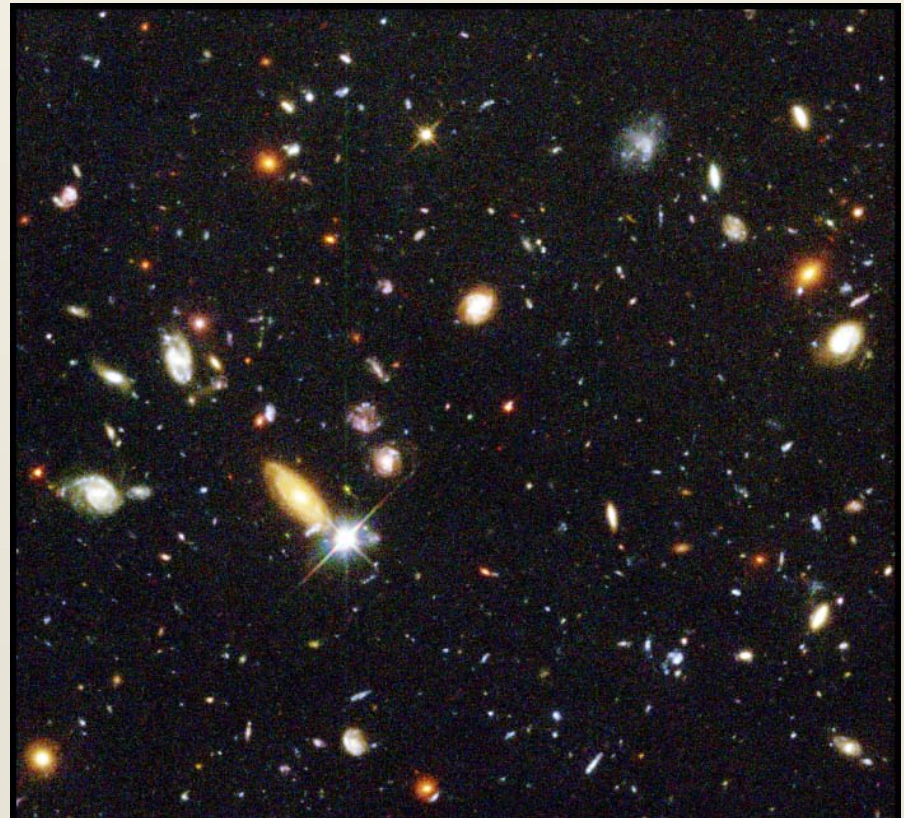
- Strudel in der Raumzeit: der Thirring-Lense-Effekt

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

# 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:

$$v_0 = H_0 D_0$$

*nicht messbar*

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

- Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation:

Beziehung zwischen

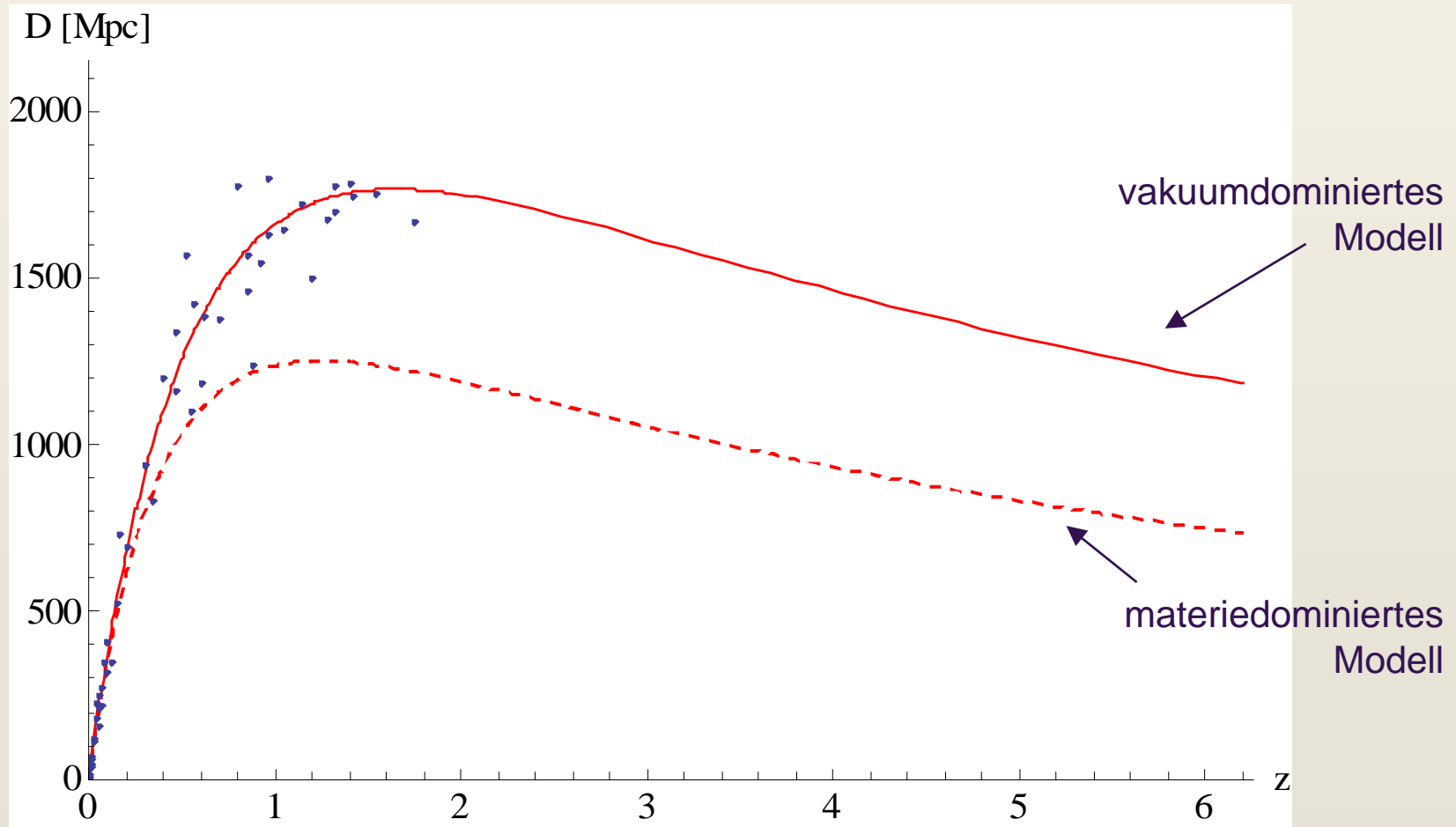
$z$  ... Rotverschiebung des beobachteten Lichts

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

← direkt messbar

← indirekt messbar

# Das beschleunigte Universum



# Das Konzept der Raumzeit in der modern(st)en Physik

---

- Eichtheorie

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/EinsteinRechnet/Eichtheorie.html>

- Moderne Elementarteilchenphysik: Die flache Raumzeit als (starre) Bühne des Geschehens, Quantenfelder leben „in ihr“.
- Eine große Herausforderung: Quantengravitation! Die Raumzeit ist dynamisch *und* ein Quantenobjekt (**Quanten-Raumzeit**)!
  - Struktur der Raumzeit auf kleinsten Skalen: diskret?
  - Geburt des Universums aus dem Nichts?
  - anthropisches Prinzip, Paralleluniversen?
  - Nichtkommunierende Raumzeit-Koordinaten?

Danke...

---

... für Ihre Aufmerksamkeit!

Diese Präsentation finden Sie im Web unter

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