

# Raum und Zeit - Kosmologie

York Schröder

(Theoretische Physik / Uni Bielefeld)



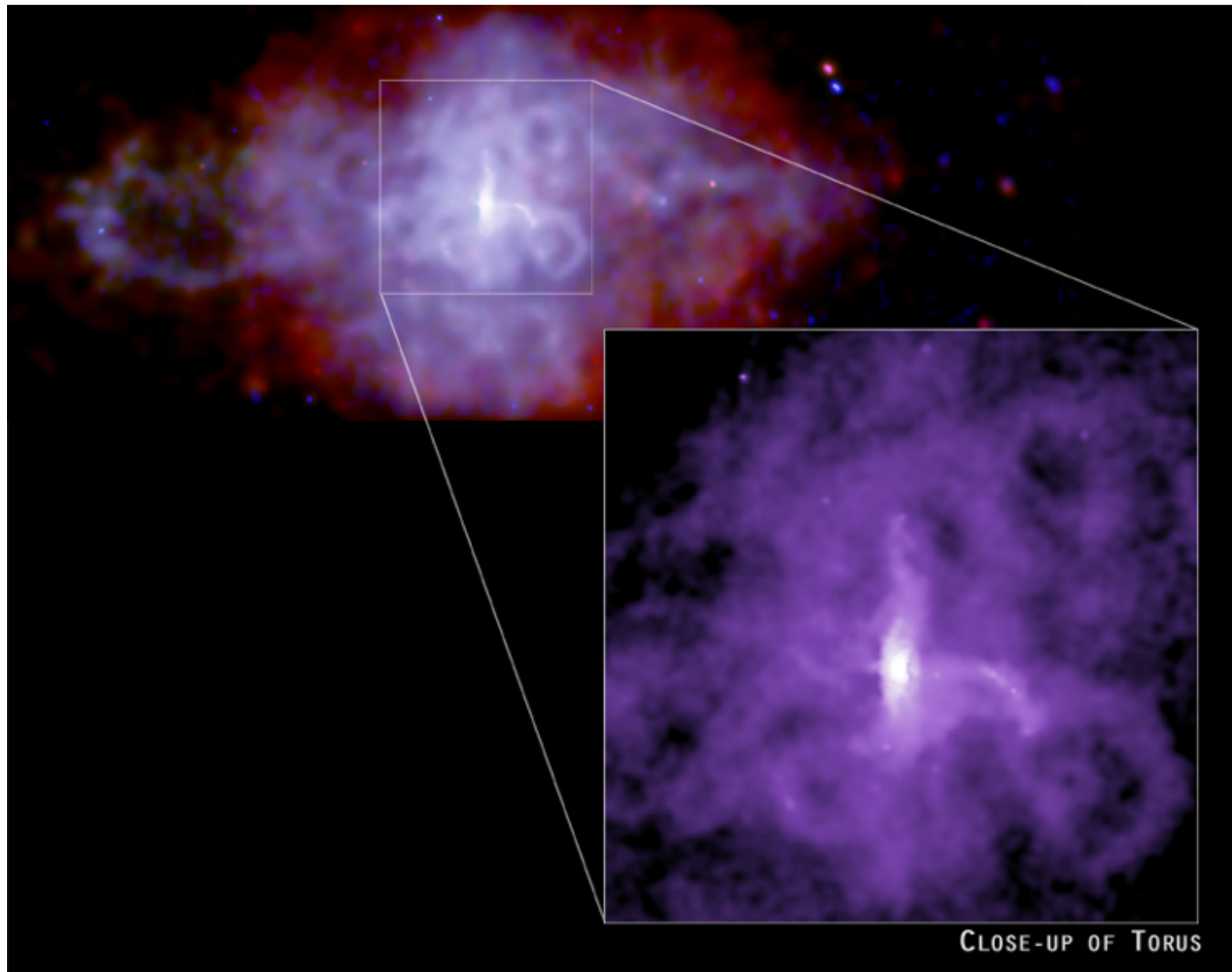
Herbstakademie Uni Bie, 13 Sep 2006



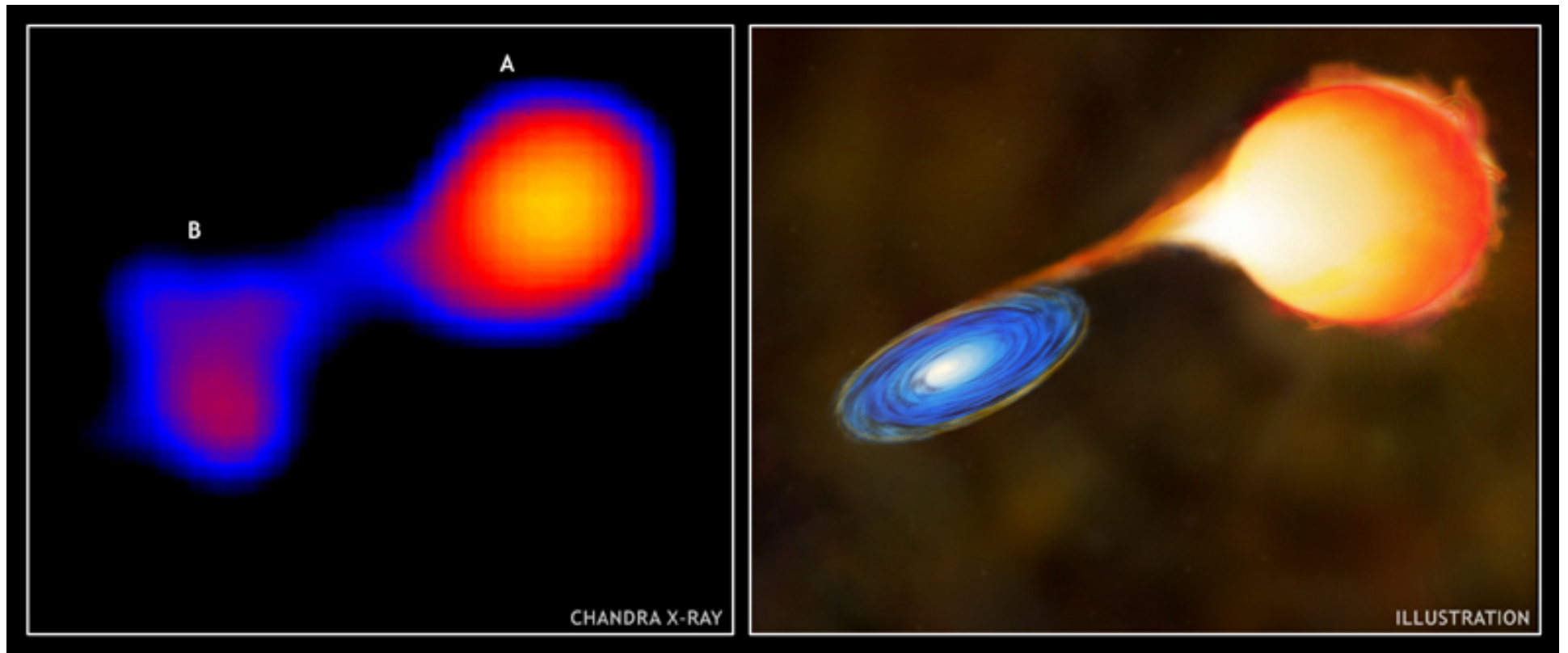
**Weisser Zwerg**, H1505+65. Temperatur: 200000 Grad



**Neutronenstern** im Krebs-Nebel. Distanz: 6000 Lichtjahre



**Neutronenstern** 3C58 (Rest der chin. Supernova 1181)  
10000 Lichtjahre. 1000000 Grad. Gewicht: 1 TL = 1 Milliarde Tonnen



links: **Weisser Zwerg**, Mira B. rechts: **Roter Riese**, Mira A.

relativ nah: 420 Lichtjahre

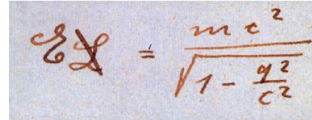
Physik = Modelle der Natur formulieren

Sprache = Mathematik

# Spezielle Rel (SRT) 1905

- neues Verständnis von 'Raum-Zeit'
- fundamentaler Fortschritt seit Newton's klassischer Physik (1687)

- Konsequenz:

A photograph of a handwritten equation on a piece of paper. The equation is  $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . The 'E' is written in a cursive style, and the 'c' in the denominator is written as 'c^2'.

*Kernidee:* physikalische Gesetze sind für alle gleichförmig bewegten Beobachter identisch (kein 'Äther').

- einfache Beschreibung des Effekts von Relativbewegung auf die grundlegendsten physikalischen Messinstrumente, Skala und (perfekte) Uhr
- die Idee war reif (Voigt, Larmor, Lorentz, Michelson) ..
- Lichtgeschwindigkeit  $c$  als obere Grenze
- einfache mathematische Formulierung: Lorentz-Transformation

z.B.  $x' = \frac{x-vt}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ ,  $t' = \frac{t-vx/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$

# Lichtgeschwindigkeit $c$

$c \approx 300000 \text{ km/s} \approx 1 \text{ Milliarde km/h}$

das ist

- 1 Million mal schneller als ein Flugzeug
- 40000 mal schneller als das Space Shuttle im Orbit

bei einer Reise mit Lichtgeschwindigkeit braucht man

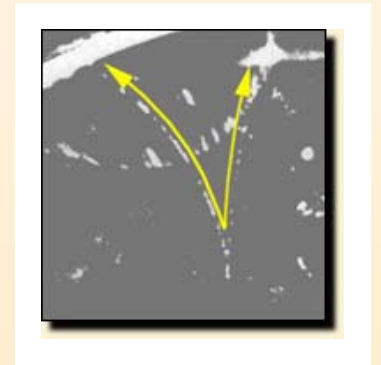
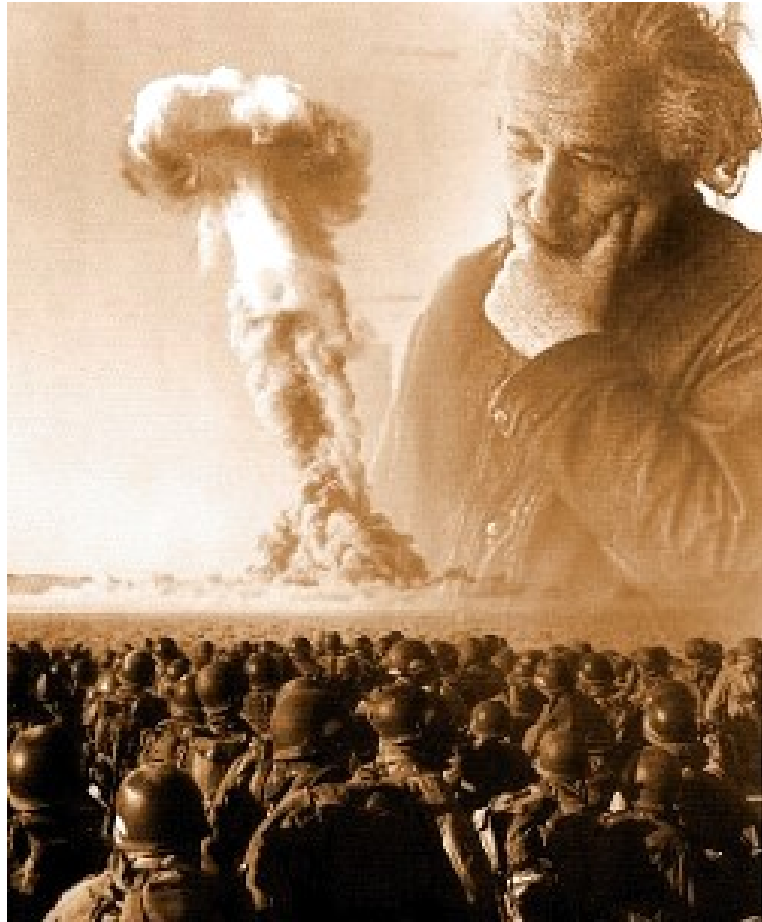
- 1 Sekunde für 7 Erdumrundungen
- 8 Minuten von der Erde zur Sonne
- 26000 Jahre zum schwarzen Loch im Zentrum der Milchstrasse

# Spezielle Rel, $E = mc^2$

haben weitreichende Konsequenzen! Einige davon:

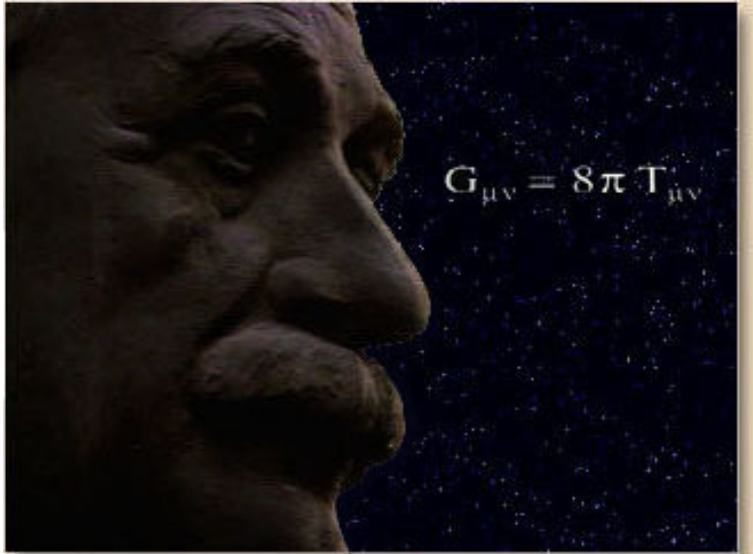
aber auch:

- warum scheint die Sonne? (schleudert  $m = E/c^2$  hinaus - etwa 4 Millionen Tonnen pro Sekunde)
- Ruheenergie einer Fahrkarte genügt, um einen Zug mehrmals um den Äquator zu schicken
- Energie  $\rightarrow$  Masse!  
Blasenkammer-Aufnahme 1933.
- etliche 'Paradoxa': Zwillinge, ..



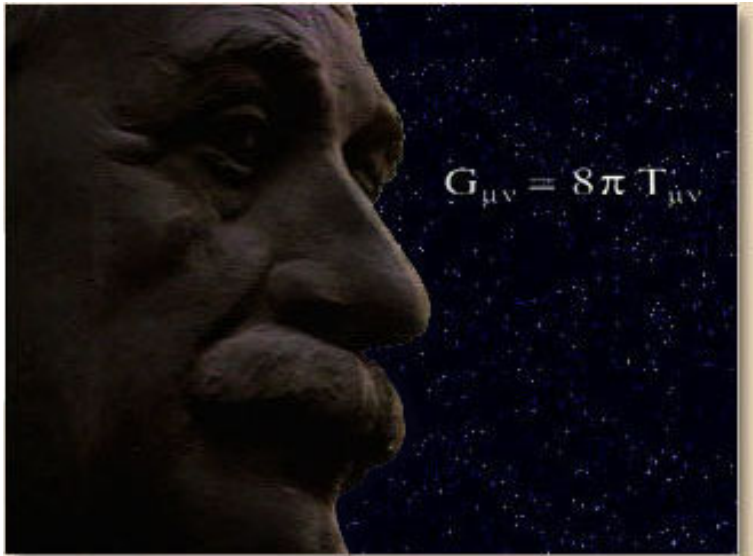


# Allgemeine Rel (ART) 1916



- “Sind Gravitations- und Beschleunigungs-Effekte unterscheidbar?”  
→ [movie by \[pbs.org,NOVA\]](#)
- “Wird Licht von Gravitation abgelenkt?”
- 10 Jahre (harter) Arbeit
- sehr komplexe Theorie ...

# Allgemeine Rel (ART) 1916



- “Sind Gravitations- und Beschleunigungs-Effekte unterscheidbar?”  
→ [movie by \[pbs.org,NOVA\]](#)
- “Wird Licht von Gravitation abgelenkt?”
- 10 Jahre (harter) Arbeit
- sehr komplexe Theorie ...

- ... aber sehr einfache Formel:  $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$
- mit interessanten Namen: Einstein-Tensor, Newton-Konstante, Feldstärke-Tensor, kosmologische Konstante, Cristoffel-Symbole, Riemann’scher Krümmungstensor, Ricci-Tensor, Krümmungs-Skalar

## ART in Formeln (sorry..)

- (einfach nur weil wir viele Abkürzungen benutzen):

$$\begin{aligned}\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} &= \frac{1}{2}g^{\mu\nu} (\partial_{\beta}g_{\nu\alpha} + \partial_{\alpha}g_{\nu\beta} - \partial_{\nu}g_{\alpha\beta}) \\ R^{\mu}_{\nu\alpha\beta} &= \partial_{\alpha}\Gamma^{\mu}_{\nu\beta} - \partial_{\beta}\Gamma^{\mu}_{\nu\alpha} + \Gamma^{\mu}_{\sigma\alpha}\Gamma^{\sigma}_{\nu\beta} - \Gamma^{\mu}_{\sigma\beta}\Gamma^{\sigma}_{\nu\alpha} \\ R_{\mu\nu} &= R^{\sigma}_{\mu\sigma\nu} \quad , \quad R = R_{\mu\nu}g^{\mu\nu} \\ G_{\mu\nu} &= R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}\end{aligned}$$

- System von 10 nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen zweiter Ordnung für den metrischen Tensor  $g_{\mu\nu}$
- dieser bestimmt schliesslich unsere Messung von Entfernungen und Zeit:  
 $ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^{\mu} dx^{\nu}$       $[\mu, \nu = 1..2: \text{Pythagoras}]$
- Lösungen geben die **Struktur der Raumzeit**
- viele interessante Lösungen: Expansion, **schwarze Löcher**, Gravitationswellen, ..
- ART brauchte neue mathematische Disziplin: Tensor-Kalkül [Ricci, Levi-Civita]

# ART in Worten

Worum geht es?

- Raum und Zeit. Warum fallen Dinge, warum kreist der Mond um die Erde, ..
- Masse krümmt Raum und Zeit. Je mehr Masse, desto besser ..
- Uhren in Bereichen grosser Raumkrümmung gehen langsamer
- Bewegung findet auf kürzesten Verbindungslinien statt.  
Diese sind manchmal nicht 'gerade' → [movie by \[pbs.org,NOVA\]](#)

# ART in Worten

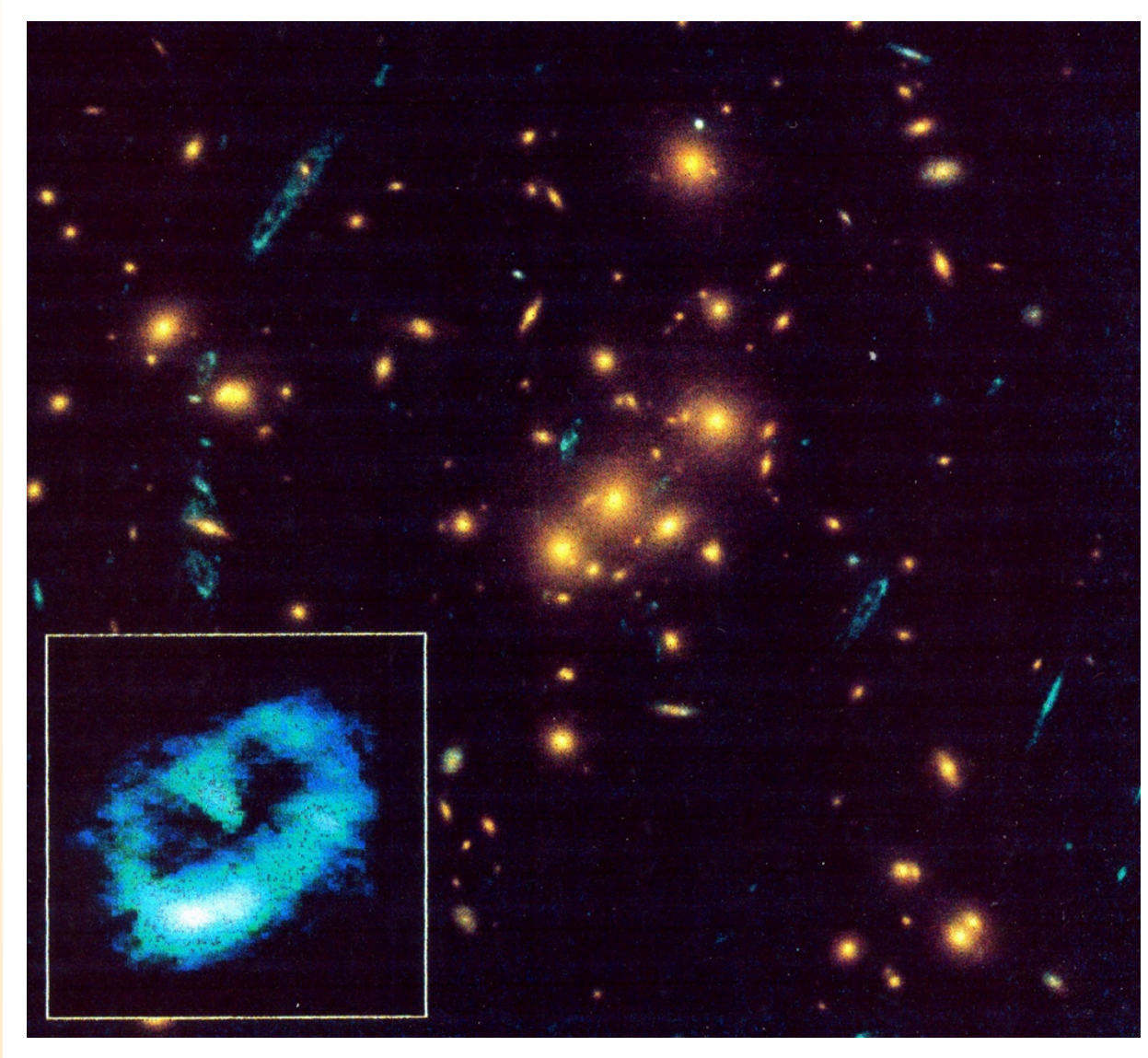
Worum geht es?

- Raum und Zeit. Warum fallen Dinge, warum kreist der Mond um die Erde, ..
- Masse krümmt Raum und Zeit. Je mehr Masse, desto besser ..
- Uhren in Bereichen grosser Raumkrümmung gehen langsamer
- Bewegung findet auf kürzesten Verbindungslinien statt.  
Diese sind manchmal nicht 'gerade' → [movie by \[pbs.org,NOVA\]](#)

Die Planetenbahnen folgen also nicht der Anziehungskraft?

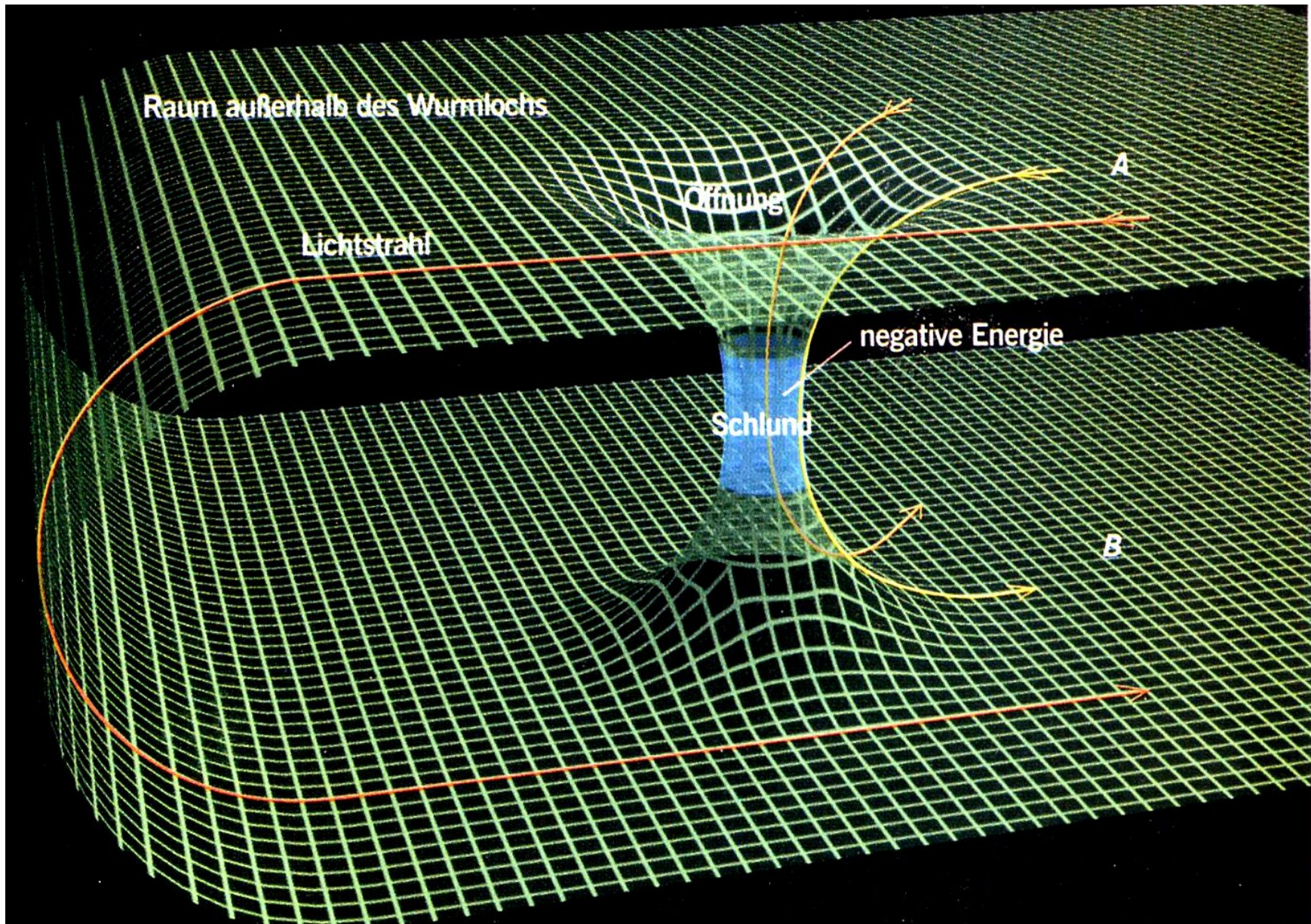
- Nein, die braucht man seit der ART nicht mehr.
- z.B.: die Erde will an der Sonne gerade vorbeifliegen, wegen der 'Delle' in der Raumzeit fliegt sie aber um die Sonne herum. Die 'Delle' ist so gross, dass sich die Umlaufbahn schliesst.

## Konsequenz der ART: Gravitations-Linsen



Galaxy Cluster 0024+1654, Hubble Space Telescope

# Konsequenz der ART: Wurmloch



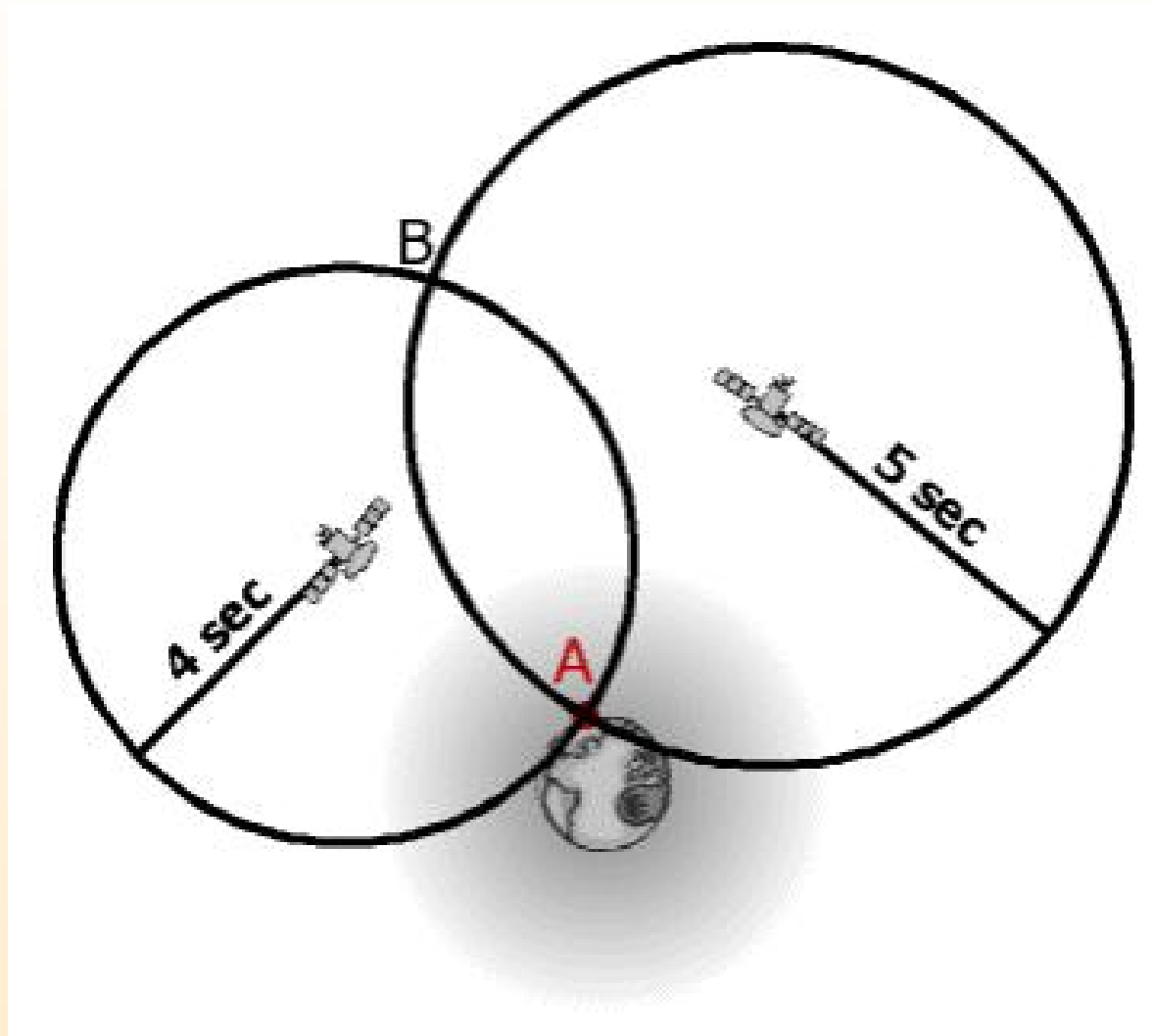
# Anwendung der S/ART: GPS



- Global Positioning System
- 24 Satelliten à 75000000 Dollar
- senden Signale: “Sat X, Pos Y, Zeit Z”
- → Positionsberechnung bei Navigation
- Atomuhren an Bord ( $\pm 1$  s in 1000000 Jahren)

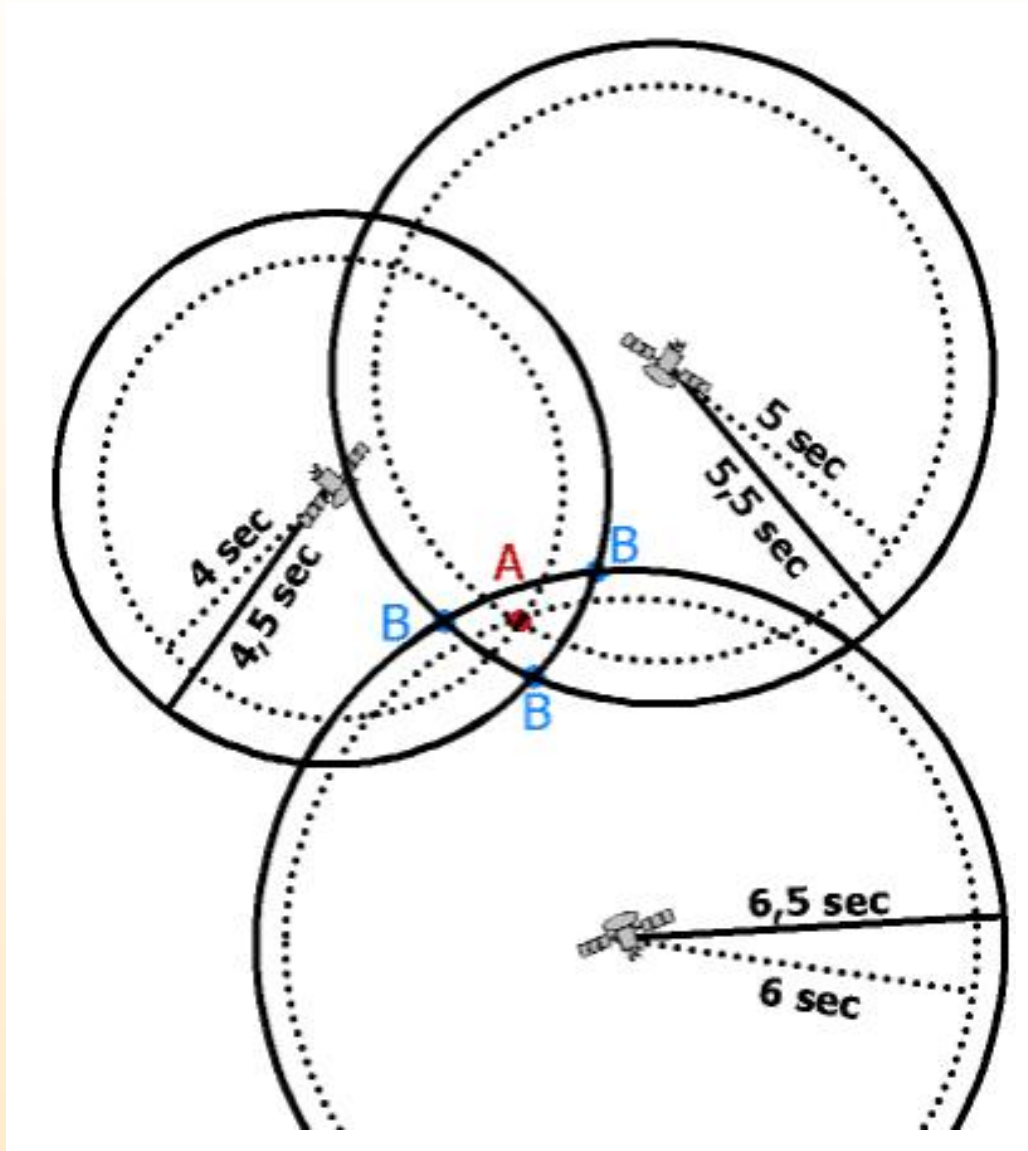


## Anwendung der S/ART: GPS



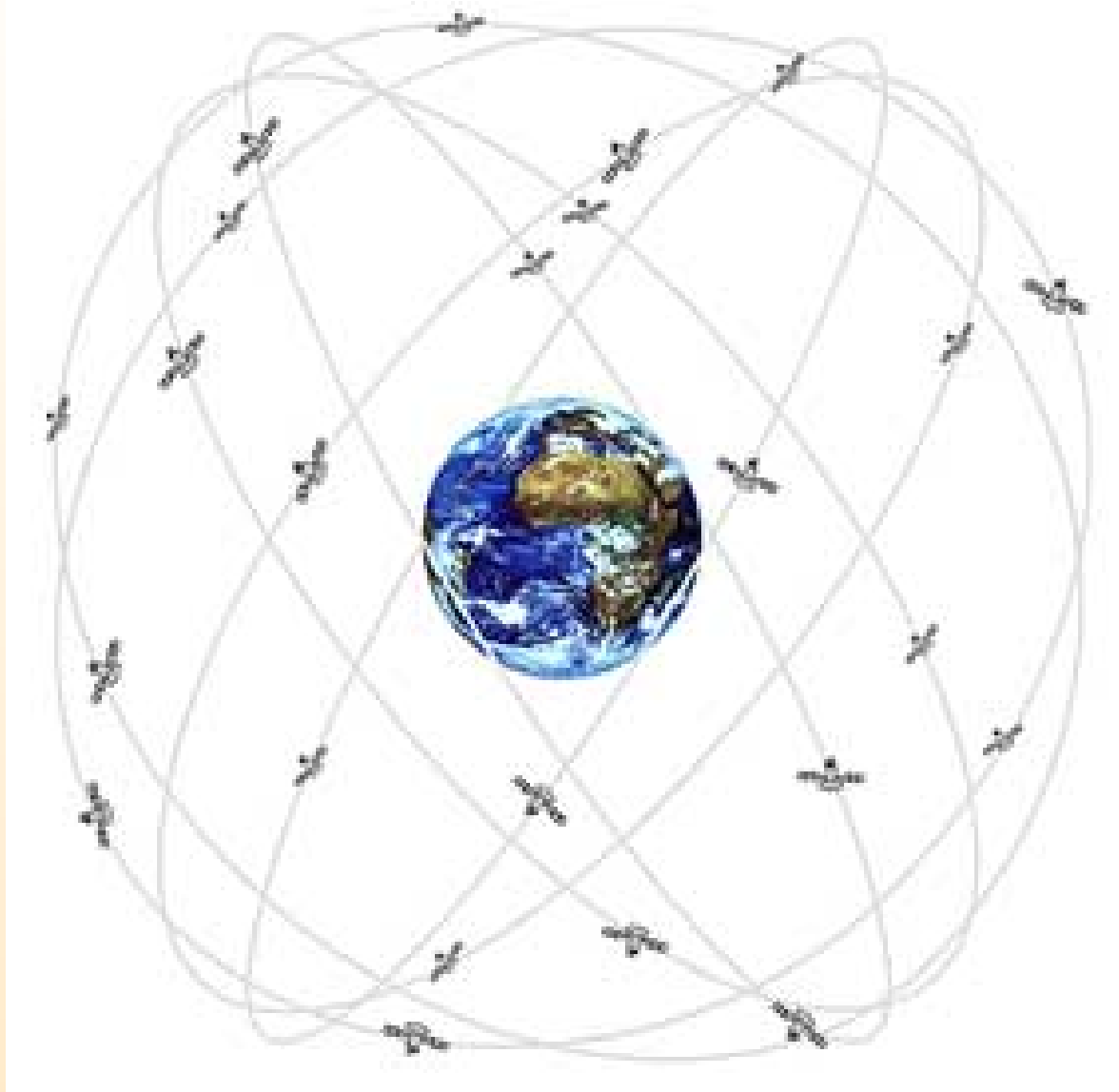
2 Satelliten im Sichtfeld reichen nicht aus

# Anwendung der S/ART: GPS



3 Satelliten erlauben "2d position fix"

# Anwendung der S/ART: GPS



≥21 Satelliten zur Abdeckung der Erde

# Anwendung der S/ART: GPS



- Global Positioning System
- 24 Satelliten à 75000000 Dollar
- senden Signale: "Sat X, Pos Y, Zeit Z"
- → Positionsberechnung bei Navigation
- Atomuhren an Bord ( $\pm 1$  s in 1000000 Jahren)

## Relativität?

- brauchen extrem genaue Zeitmessung
- Satelliten-Bewegung: 4 km/s → Zeitdilatation:  $-7.2 \mu\text{s}/\text{Tag}$
- Gravitationsfeld: 20200 km Höhe → ca.  $+45 \mu\text{s}/\text{Tag}$
- also: Uhr auf Satellit ca  $38 \mu\text{s}/\text{Tag}$  zu schnell
- ohne Korrektur: Ungenauigkeit ca. 10 km/Tag

# Zusammenfassung/Ausblick



- Paradigmenwechsel Anfang des 20.Jh:  
Raumzeit ist dynamisch
- prägender Einfluß auf Physik, Kosmologie
- Newton etabliert Gravitation in voller Einfachheit und Universalität
- Einstein enthüllt Gravitation als Phänomen der Weltgeometrie
- 'graue' Theorie? Kein **GPS** ohne ART!



Bildquelle: [photojournal.jpl.nasa.gov](http://photojournal.jpl.nasa.gov)

Filmquellen: [www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de](http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de), [hubblesite.org](http://hubblesite.org)

Soundquelle: [faculty.washington.edu/jcramer](http://faculty.washington.edu/jcramer)