 Agilent 5071A  
PRIMARY FREQUENCY STANDARD

# Relativistische Effekte auf Atomuhren

**André Stefanov**  
Universität Bern

29.09.2012, 125 Jahre PGZ

# A. Einstein: Mitbegründer der Quantenphysik



1905: *Annalen der Physik* **17** (6): 132–148.

"Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt"

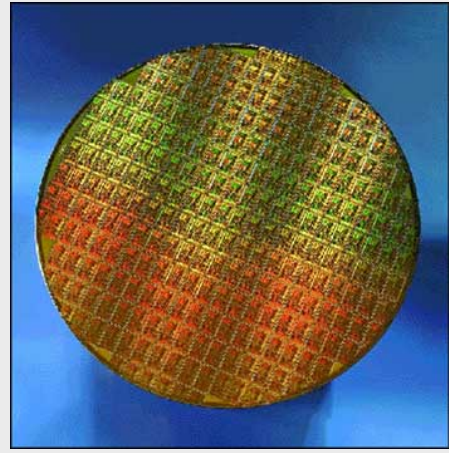
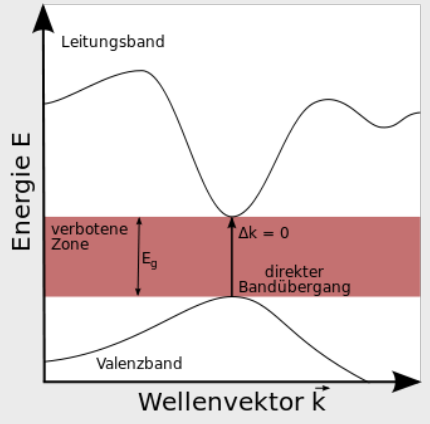
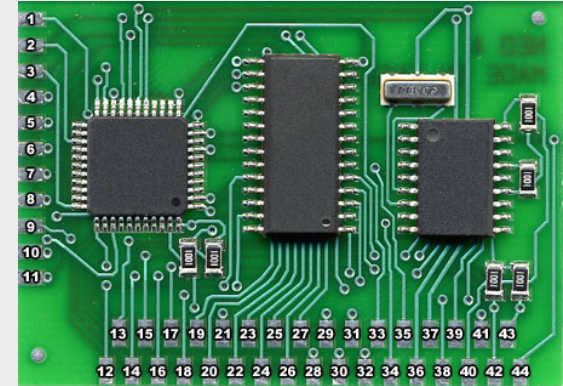
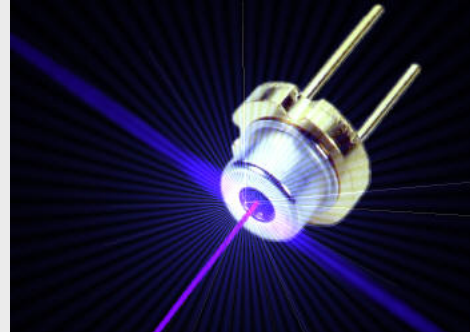
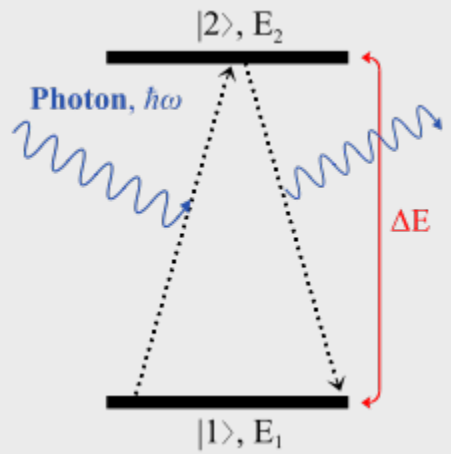
1909: *Physikalische Zeitschrift* **10**: 817–825.

"Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung"

1917: *Physikalische Zeitschrift* **18**: 121–128

"Zur Quantentheorie der Strahlung"

# Technologische Erfolge der Quantentheorie

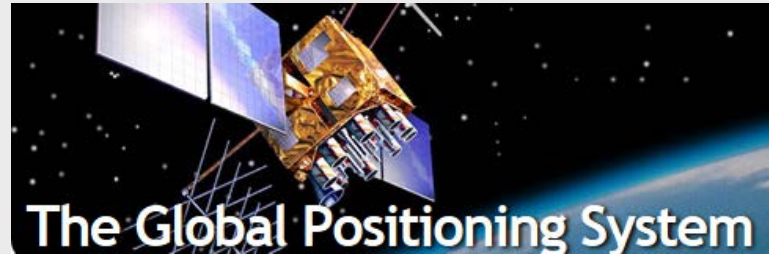


# Quantentheorie vs Relativitätstheorie

Quantentheorie	Relativitätstheorie
Laser	
Halbleiter	
Transistoren	?
Magnetismus	
Kommunikationstechnik	
...	

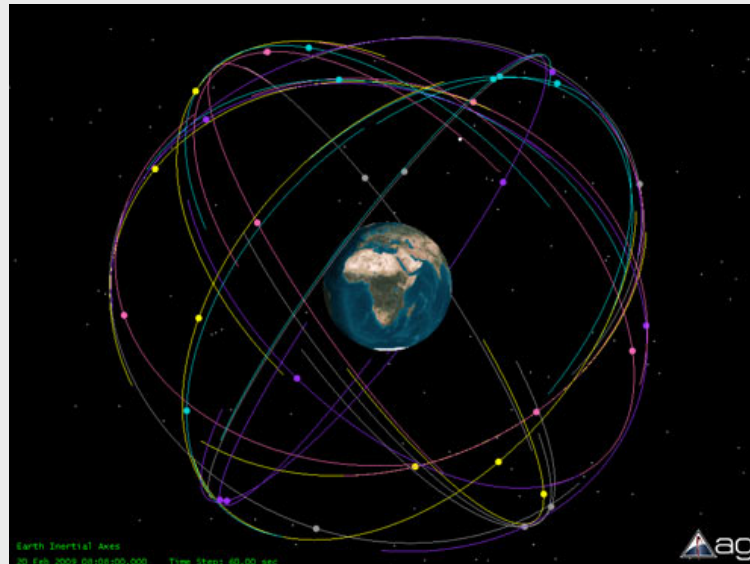
# Relativistische Technologie

Seit 1980



31 Satelliten

Kreisförmigen Umlaufbahnen in 20.200 km Höhe mit 55° Inklination



# Andere Global Navigation Satellite Systems

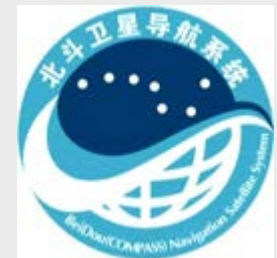
- GLONASS: Russland, in Betrieb - 24 Satelliten



- GALILEO: Europa, in Vorbereitung – 2 Satelliten



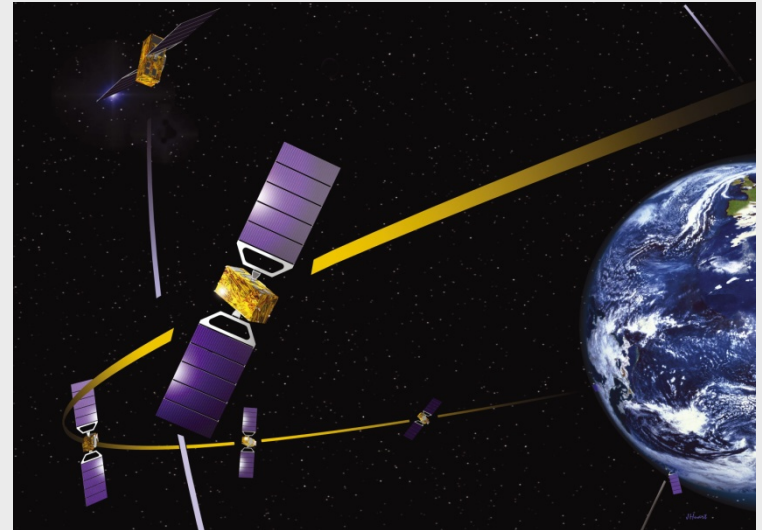
- COMPASS: China, in Vorbereitung – 15 Satelliten



# GALILEO

2 erste Satelliten : 21.10.2011

Weitere 2 Satelliten: 12.10.2012

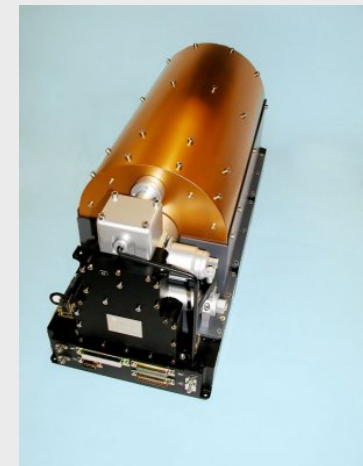


Schweizerische Atomuhren auf GALILEO Satelliten

Rubidium Uhren



Passiv Wasserstoff Maser

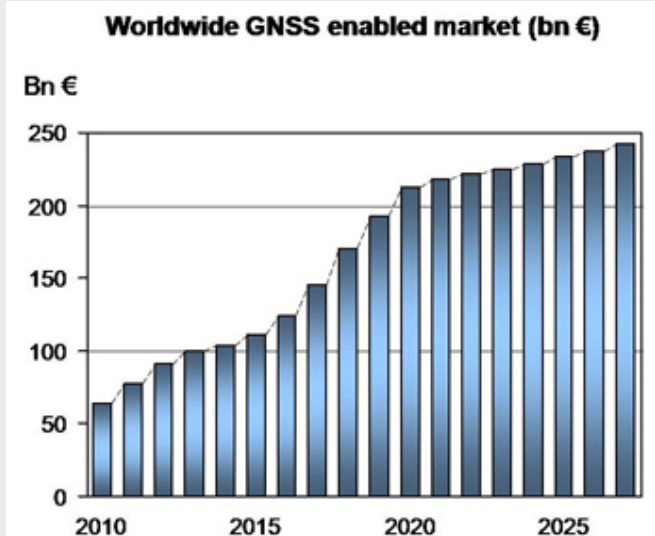


# Quantentheorie vs Relativitätstheorie

Quantentheorie	Relativitätstheorie
Laser	
Halbleiter	
Transistoren	?
Magnetismus	
Kommunikationstechnik	
...	



# Zahlreiche Anwendungen



# Der Technik nicht blind vertrauen

## GPS routed bus under bridge, company says

Driver says he didn't see warning signs or lights, is cited for crash that hurt 5

By JENNIFER LANGSTON, P-I REPORTER

Updated 10:00 p.m., Thursday, April 17, 2008



# Inhalt

1. Einführung
2. Atomuhren
3. Vergleich von zwei Atomuhren
4. Vergleich von mehreren Atomuhren
5. Zukunft

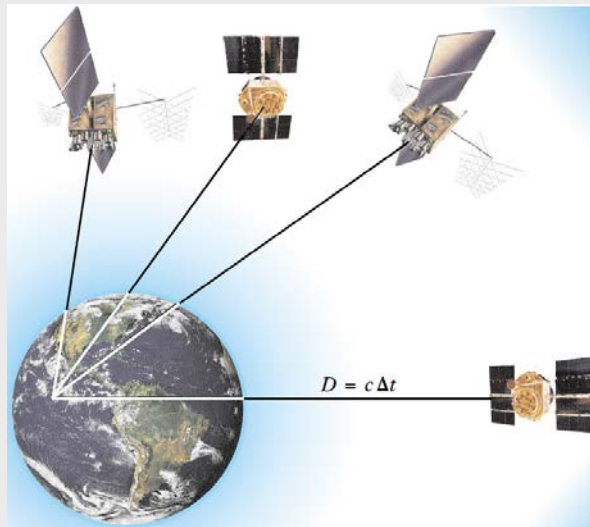
# GPS: Abstände messen

Ein Meter ist seit 1983:

*Die Strecke, die das Licht im Vakuum in einer Zeit von  
1 / 299 792 458 Sekunde zurücklegt.*

Eine Sekunde ist seit 1967:

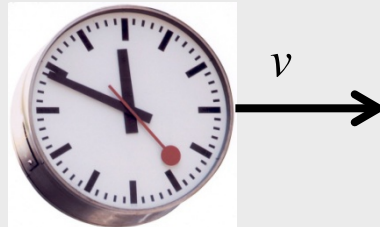
*Das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang  
zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des  
Grundzustandes von Atomen des Nuklids <sup>133</sup>Cs entsprechenden  
Strahlung.*



$$|\vec{r} - \vec{r}_i| = c(t - t_i) \quad i = 1, 2, 3, 4$$

# Relativistische Effekte

- Relativistischer Dopplereffekt



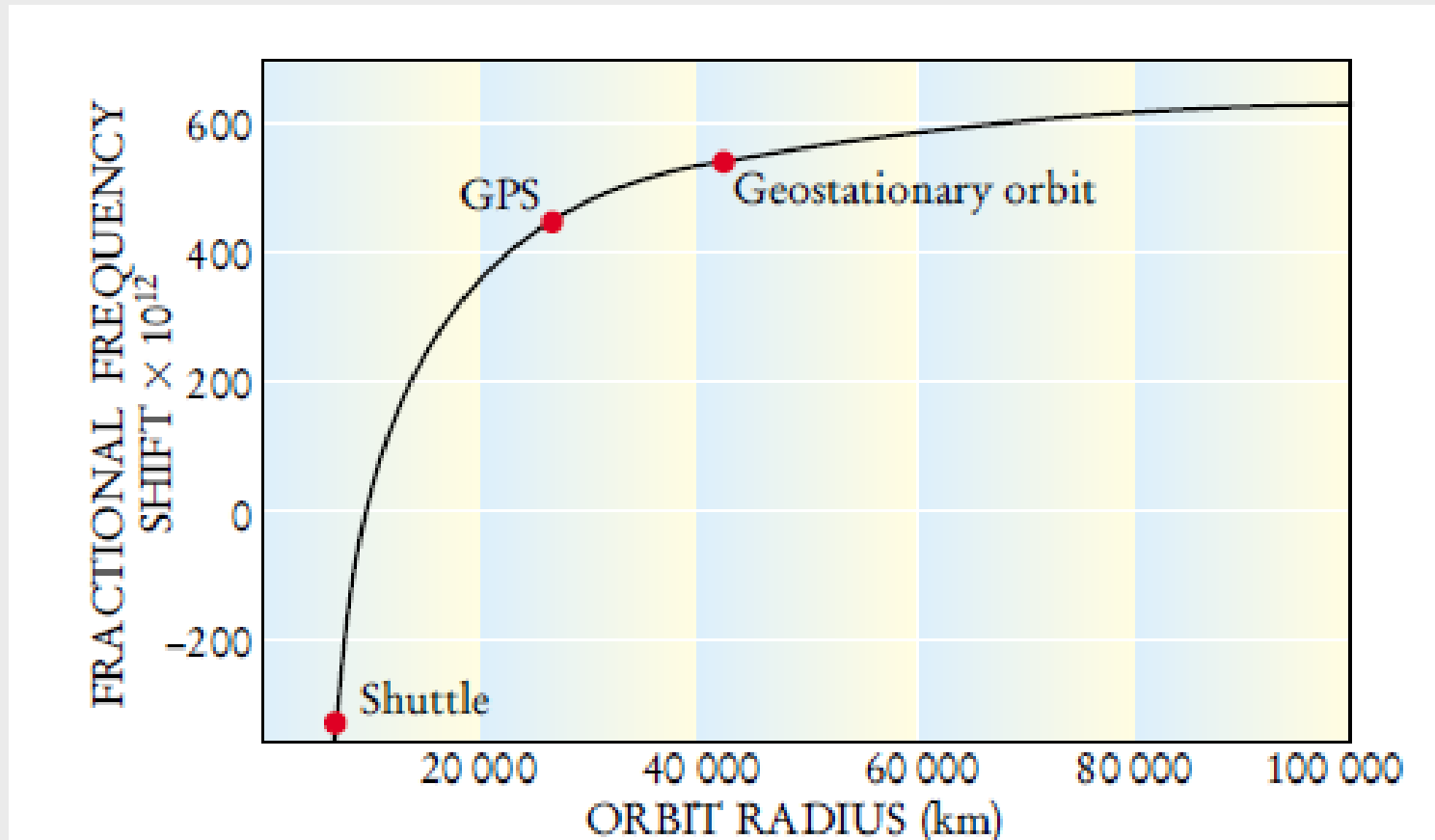
$v$	$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v^2}{2c^2}$
4 km/s	$-10^{-10}$
13 m/s	$-10^{-15}$

- Gravitation Frequenzverschiebung



$h$	$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\Phi}{c^2}$
1 m	$10^{-16}$
20000 km	$5 \times 10^{-10}$

# Relativitätseffekte auf GPS Uhren

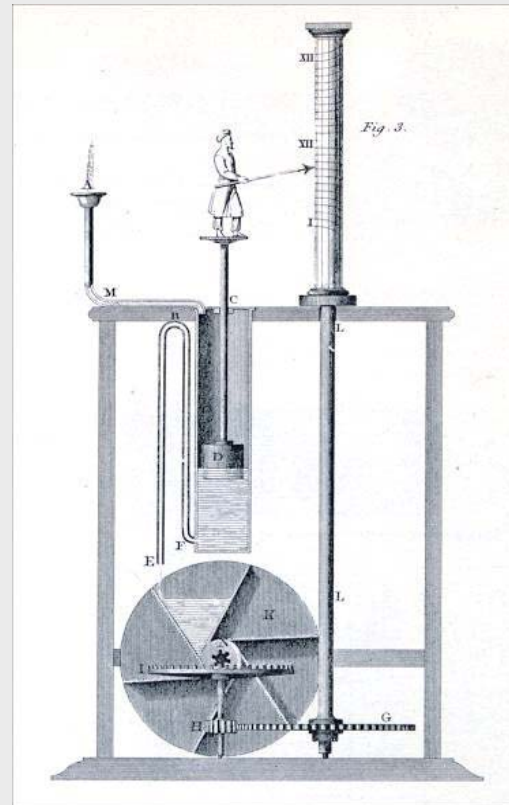
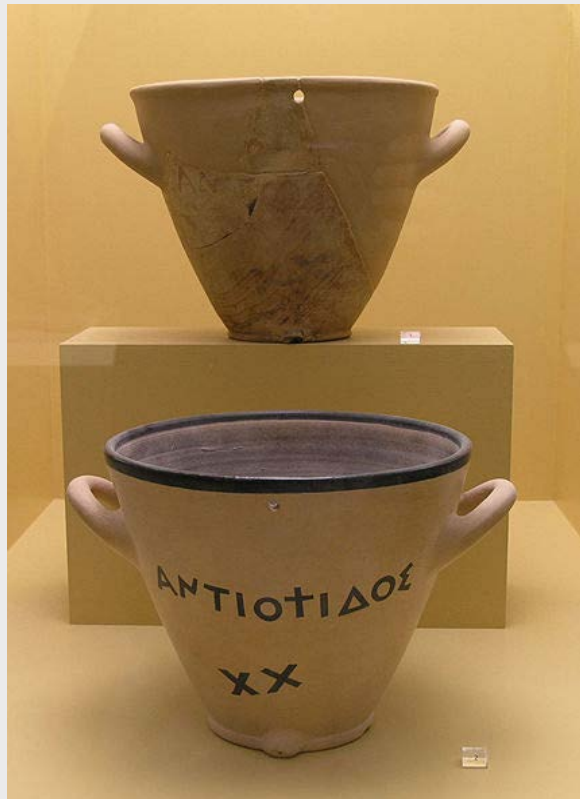


# Inhalt

1. Einführung
2. Atomuhren
3. Vergleich von zwei Atomuhren
4. Vergleich von mehreren Atomuhren
5. Zukunft

# Primitiven Uhren

## Wasseruhr



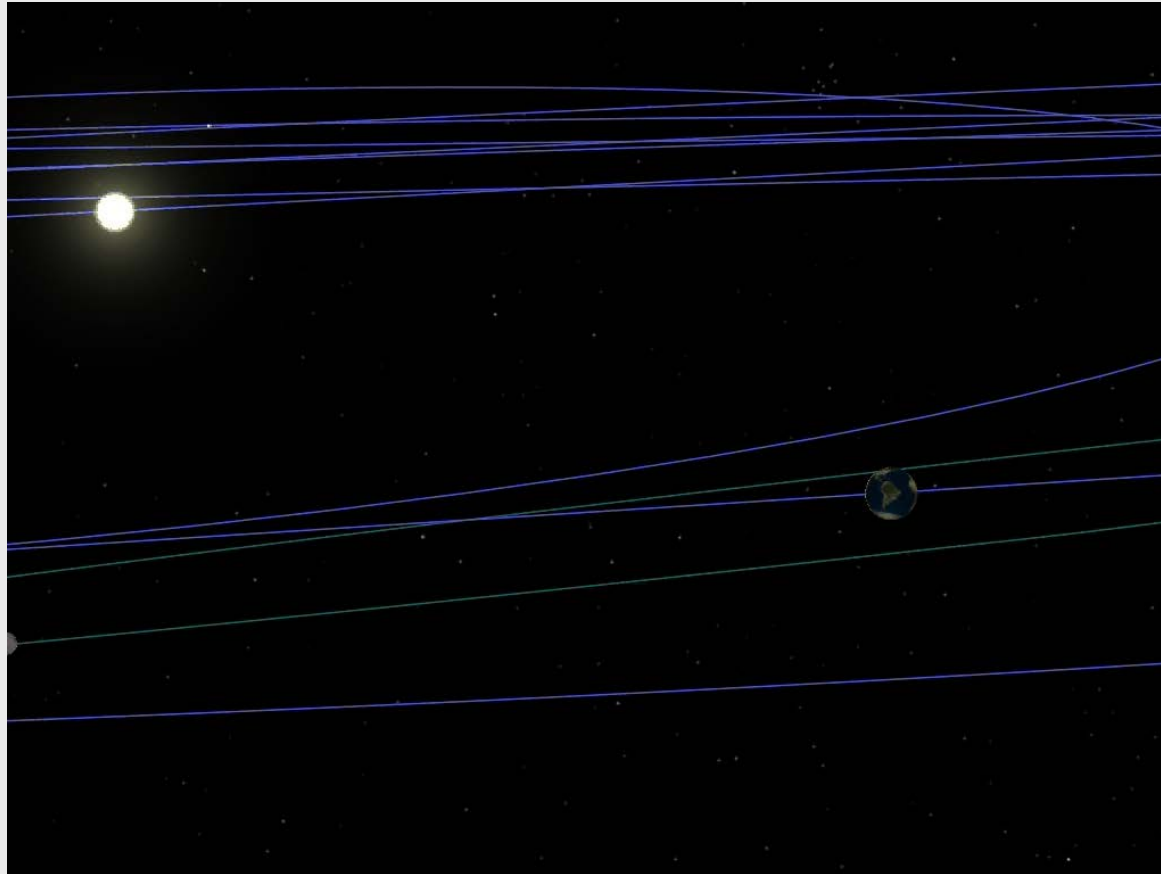
## Kerze



Nur Zeitintervalle werden gemessen



# Astronomische Uhren



Periodische Bewegungen

Erdumdrehung um ihre Achse

→

Tage

Monddrehung um die Erde

→

Monate

Erddrehung um die Sonne

→

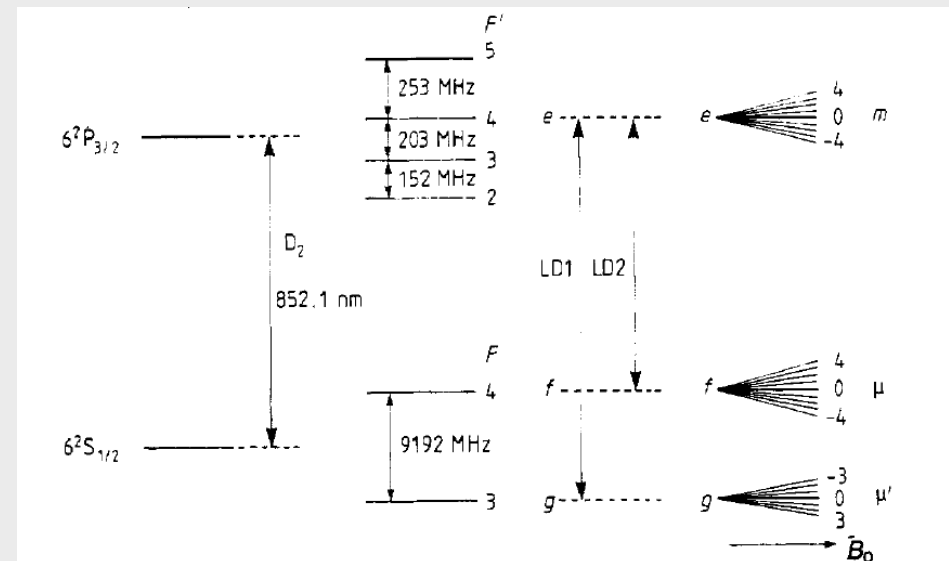
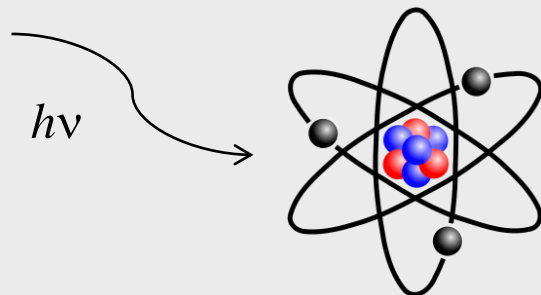
Jahre

# Atomuhren

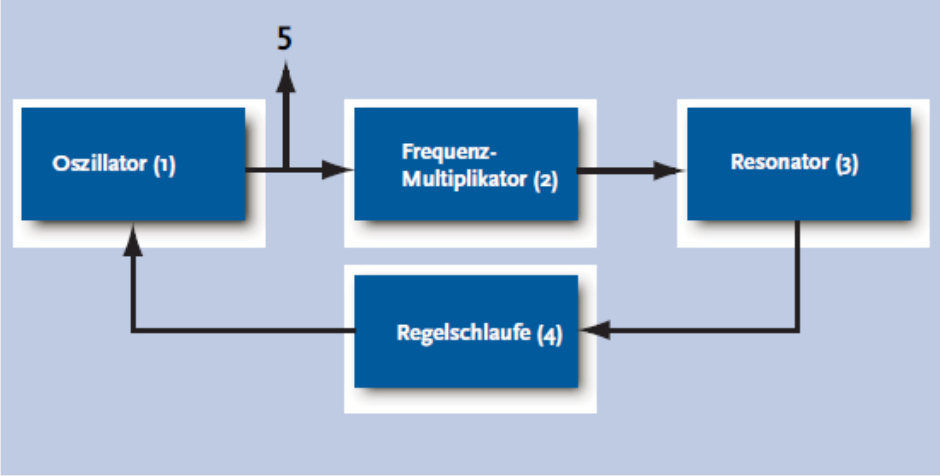
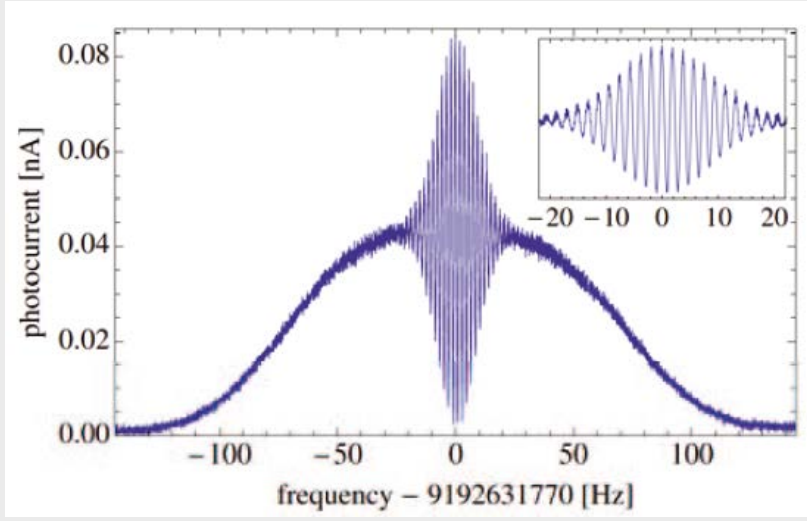
Atomare Übergänge als Referenz für Frequenz

- Universale Eigenschaften
- Hohe Frequenz

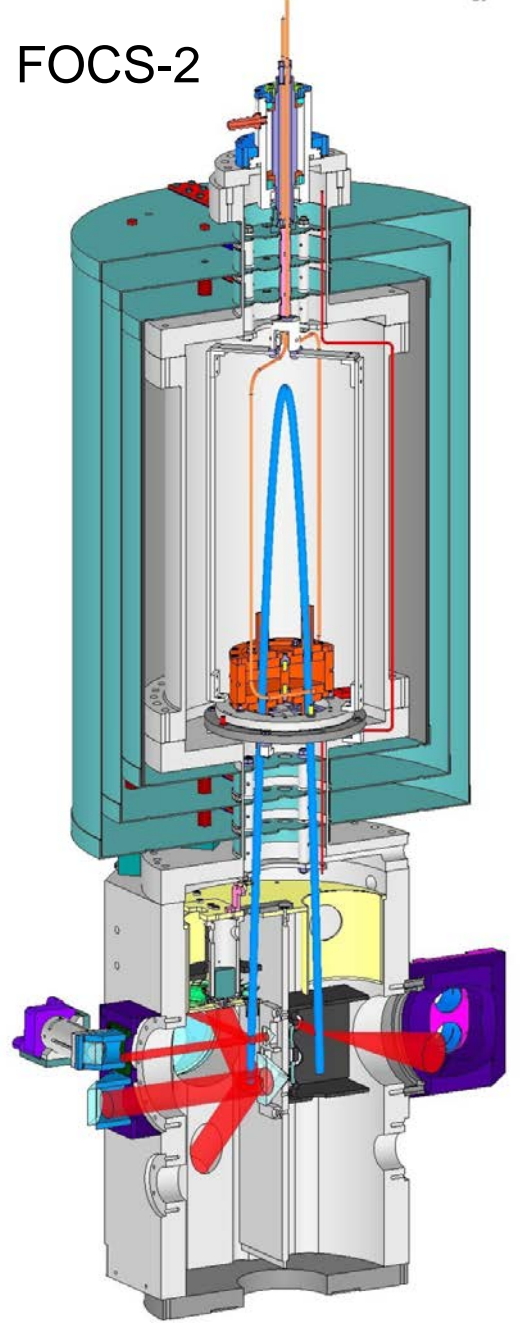
Idealerweise mit einem einzigen Atom



# Cäsium Frequenznormal



## FOCS-2

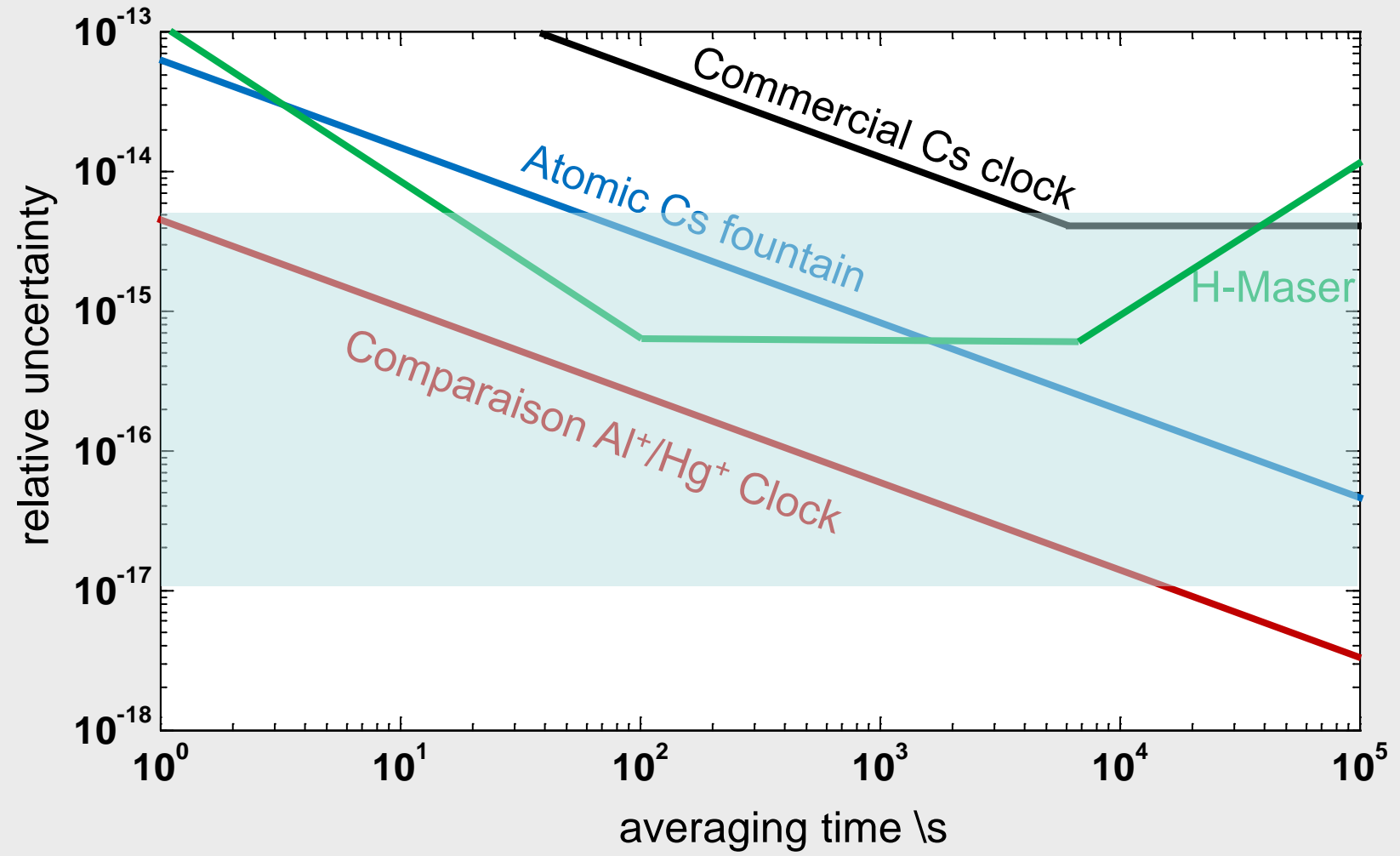


# Unsicherheitsbudget

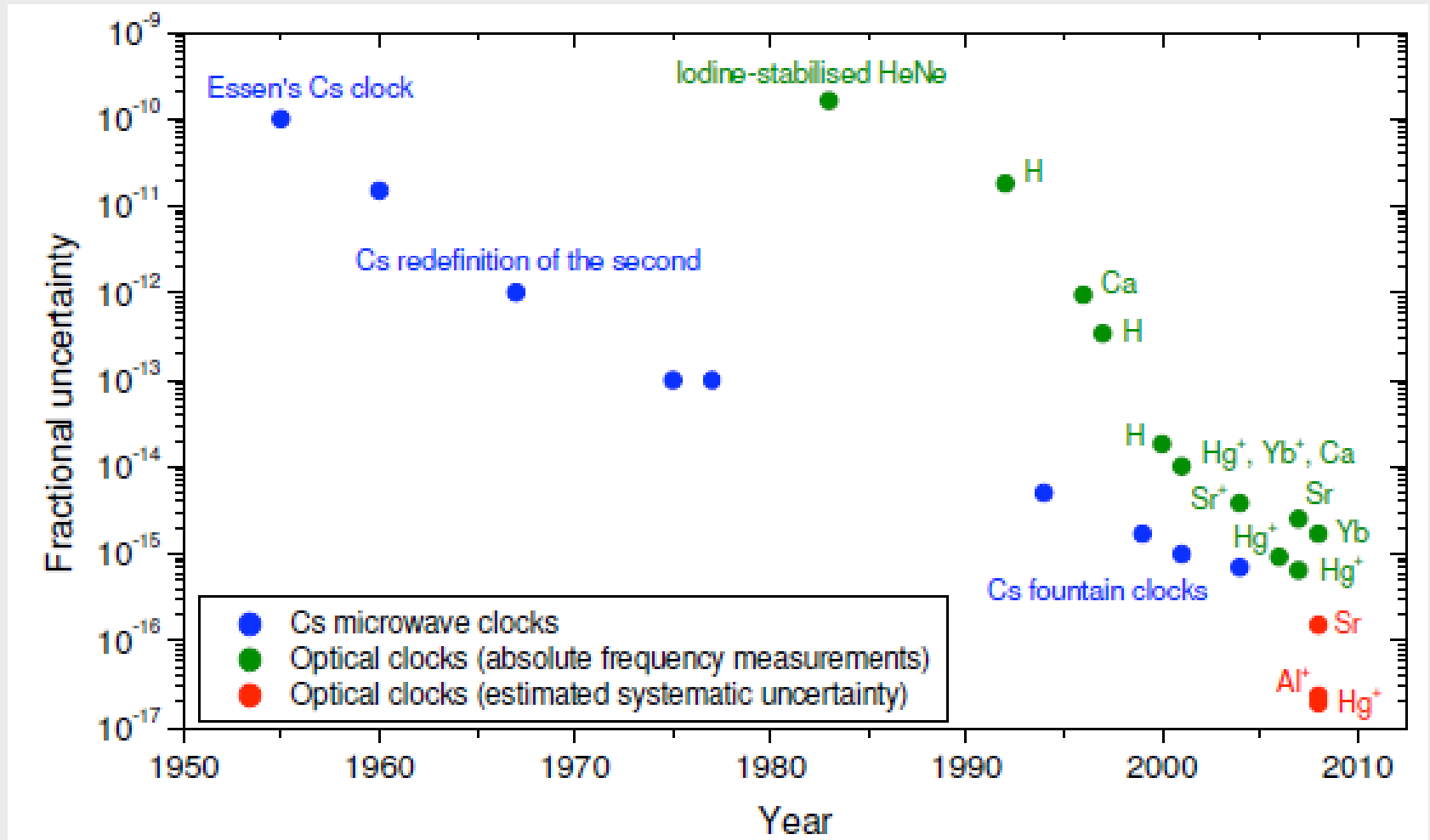
Source of uncertainty in 10 <sup>-15</sup>	Bias	Uncertainty
<b>Corrected Biases</b>		
Second order Zeeman	25.40	0.20
Blackbody radiation	-16.12	0.44
Gravitational shift	59.67	0.23
End to end Cavity	1.70	0.90
<b>Non corrected Biases</b>		
2nd order Doppler	-0.03	0.03
DC Electric Field	-0.01	0.01
Passive Cavity pulling	<	0.10
Active Cavity pulling	<	0.10
Rabi pulling	<	0.01
Ramsay pulling		2 or (6x10 <sup>-5</sup> )
Collisional shift	<	1.00
Light shift	<	0.16
Electronics shifts		to do
Cavity phase gradients		to do
Background gas		to do
Majorana		to do
<b>Sum</b>	70.65	1.46

# Stabilität

Relativistische  
Experimente auf der  
Erdoberfläche



# Genauigkeit



# Inhalt

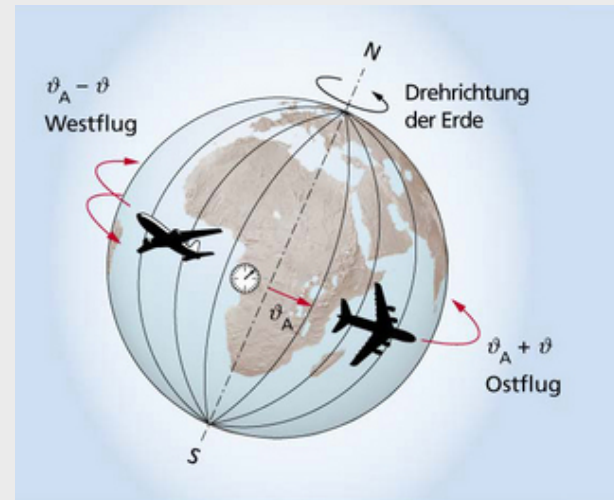
1. Einführung
2. Atomuhren
3. Vergleich von zwei Atomuhren
4. Vergleich von mehreren Atomuhren
5. Zukunft

# Hafele-Keating Experiment

1972: Hafele, J. C., & Keating, R. E., *Science* 177(4044), 168  
 “Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains.”



2 Sitzplätze für Mr. Clock



Clock serial No.	$\Delta\tau$ (nsec)	
	Eastward*	Westward
120	- 57	277
361	- 74	284
408	- 55	266
447	- 51	266
Mean		
± S.D.	- 59 ± 10	273 ± 7
Predicted		
± Error est.	- 40 ± 23	275 ± 21



# Iijima-Fujiwara Experiment

1978: Iijima, S. & Fujiwara, K., *Annals of the Tokyo Astronomical Observatory, Second Ser., Vol. 17, p. 68 - 78*

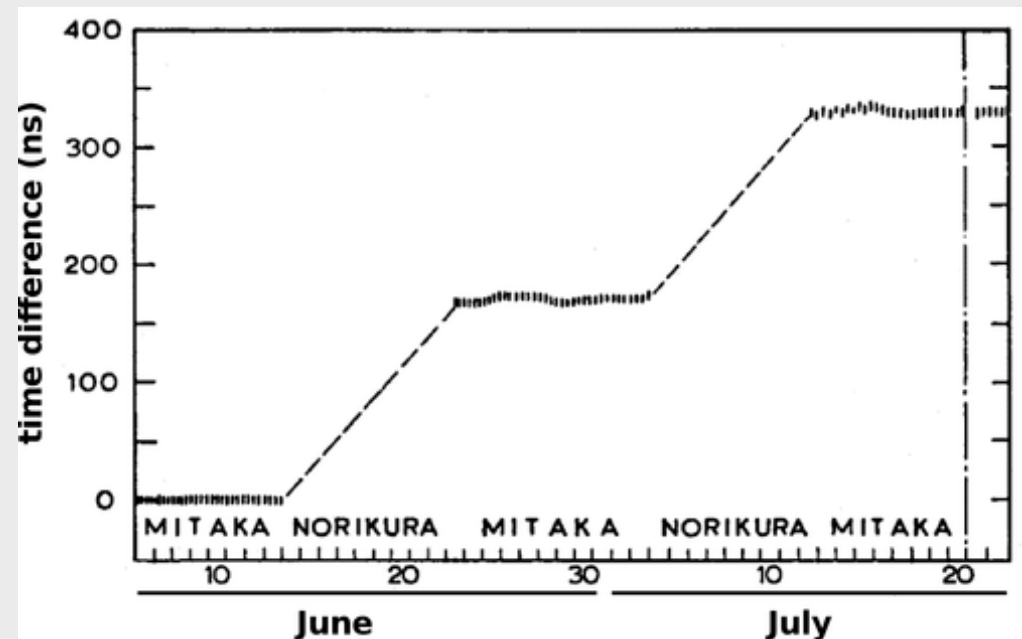
“An experiment for the potential blue shift at the Norikura Corona Station.”



Mitaka Observatorium - 58m



Norikura Station – 2876m



# Vessot Experiment

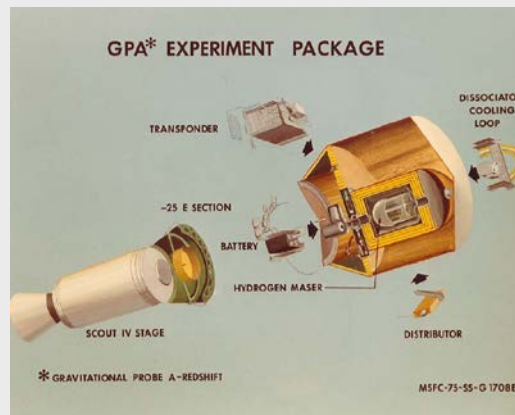
1980: Vesot, R. F. C. et al., *PRL*, 45, 26, 2081–2085.

“Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser.”

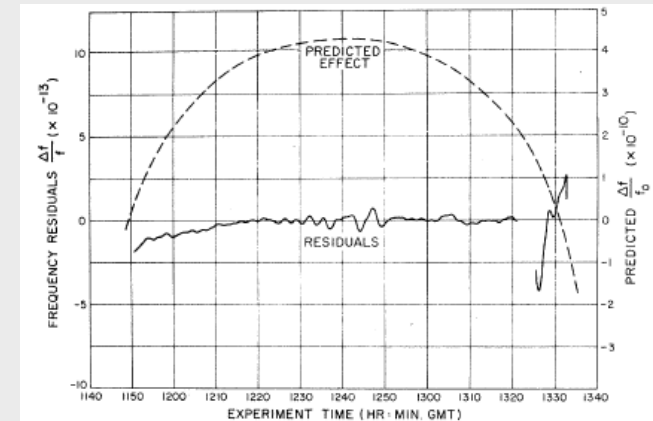
“Gravity Probe A”

Raketenantriebener Flug bis eine Höhe von 10000 km

Senkrecht freier Fall während fast 2 Stunden.



$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Phi_s - \Phi_e}{c^2} - \frac{\Delta v^2}{2c^2} - \frac{\vec{r}_{se} \cdot \vec{a}_e}{c^2}$$

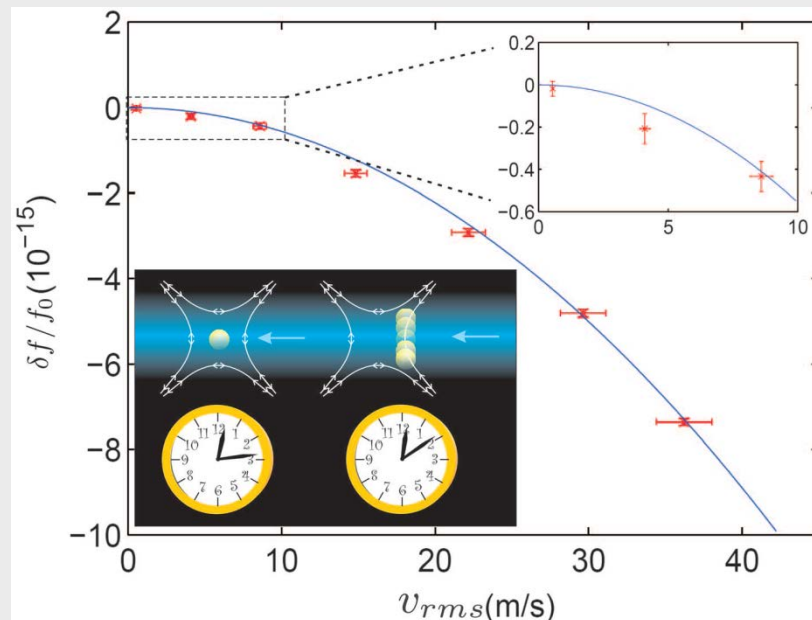


Die Theorie ist bestätigt mit  $70 \times 10^{-6}$  Unsicherheit.

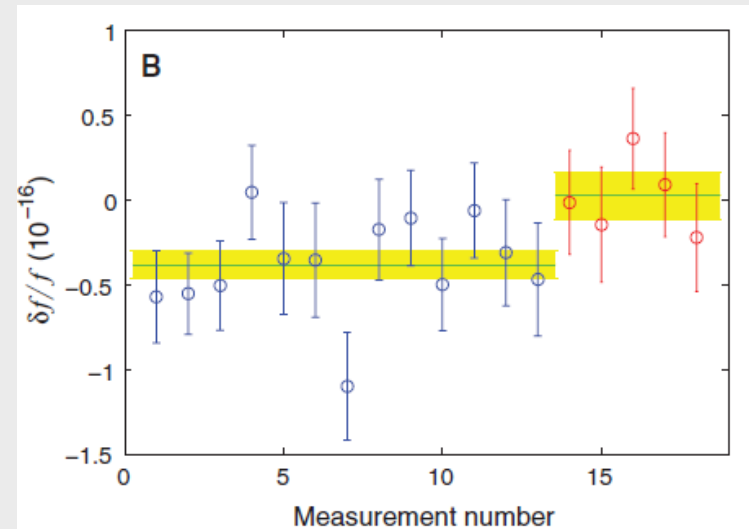
# Chou Experiment

2010: Chou, et al., *Science* 329(5999), 1630–3.  
 “Optical clocks and relativity. “

Vergleich von zwei optischen Al<sup>+</sup> Atomuhren mit 75 m Abstand



Relativistischer Dopplereffekt



Gravitation Frequenzverschiebung  
 $(4.1 \pm 1.6) \times 10^{-17}$  auf 33 cm

# Inhalt

1. Einführung
2. Atomuhren
3. Vergleich von zwei Atomuhren
4. Vergleich von mehreren Atomuhren
5. Zukunft

# Spannungen zwischen diversen Zeitskalen

Zeitskala: eine Rate, ein Ursprung und ein Bezugssystem

Verschiedene Anforderungen

## Physiker:

Ein Bezugssystem (Erde) : TAI (Mittelwert von vielen Atomuhren)

## Astronomen:

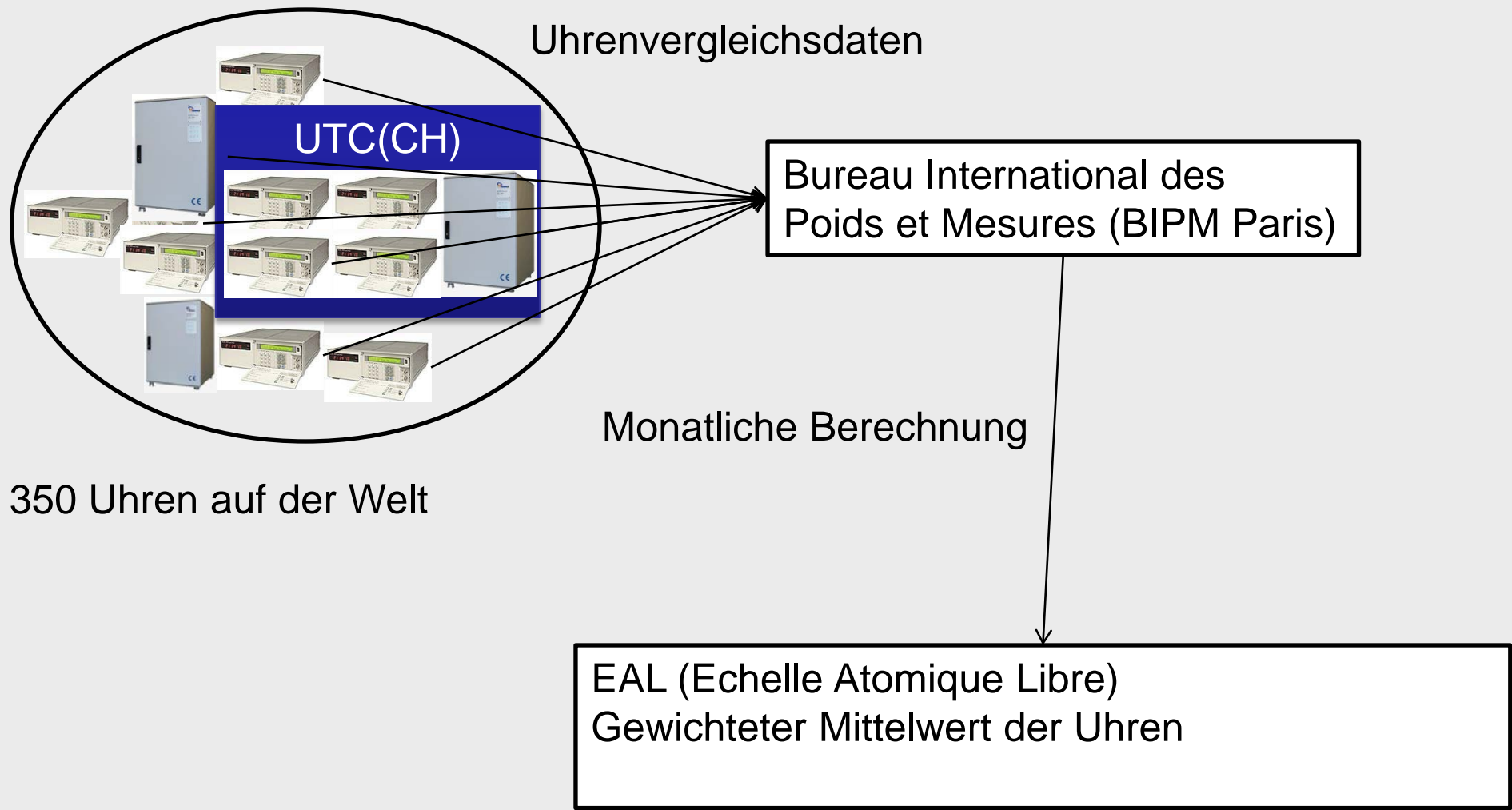
Verschiedene Bezugssysteme (Erde, Sonne) + Kontinuität:

- Barycentric Coordinate Time (TCB)
- Geocentric Coordinate Time (TCG)
- Terrestrial Time ( $TT = TAI + 32.184s$ )

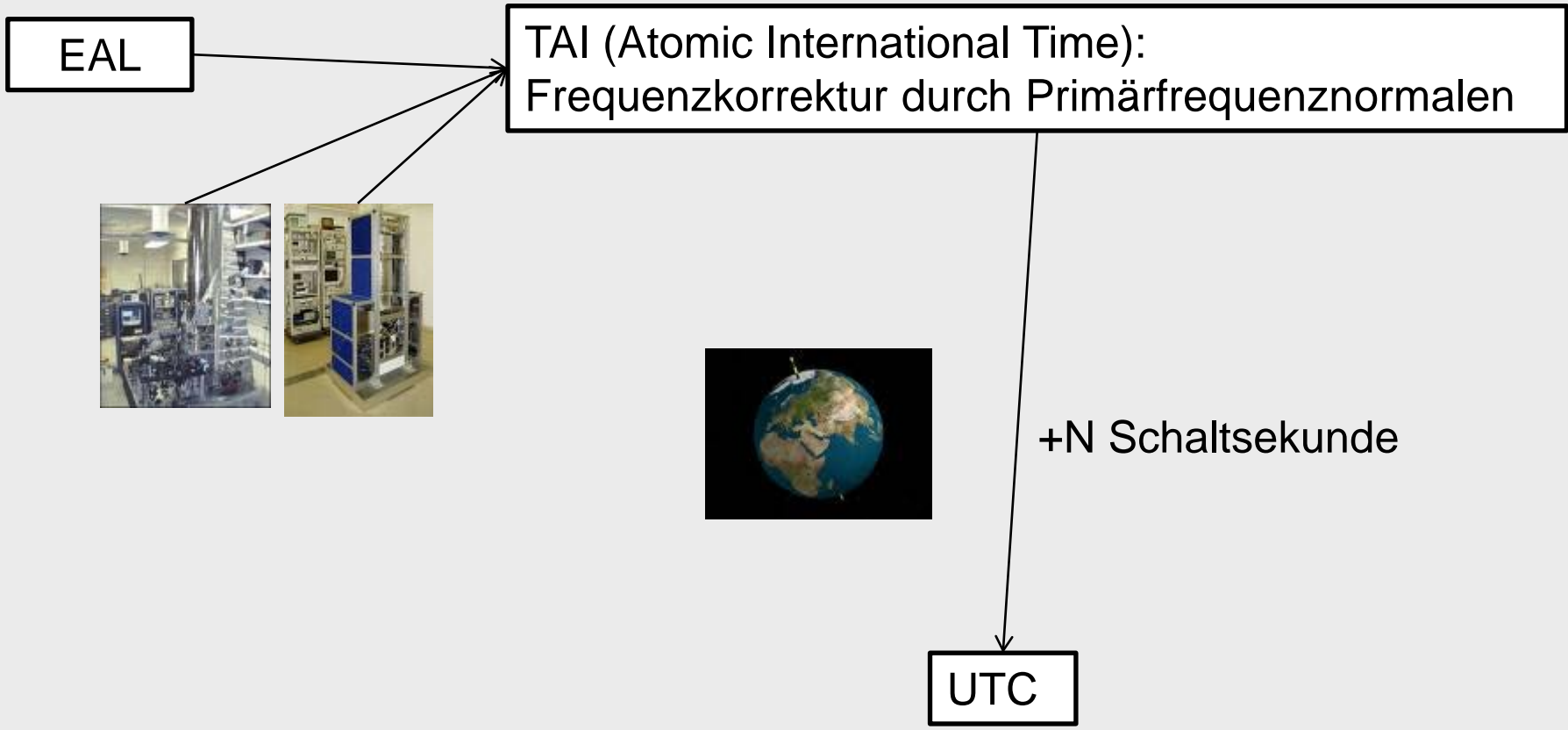
## Alle:

Stabilität, Verfügbarkeit, im Einklang mit Sonnenzeit : UTC

# UTC (1)



# UTC (2)



# Institute die zu UTC beitragen

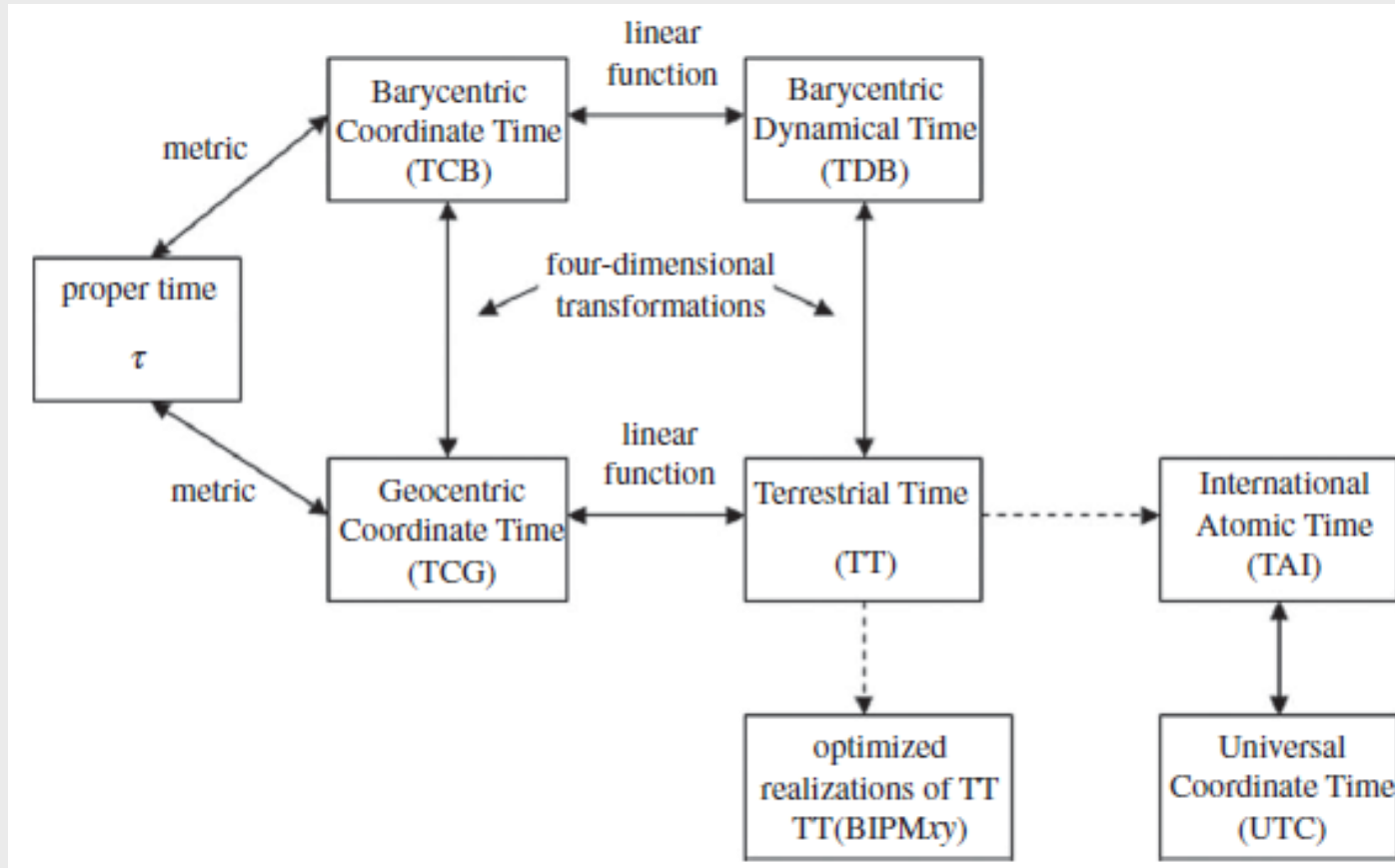
Mitwirkende Länder: 51

Mitwirkende Institute: 68





# Viele Zeitskalen



Erst seit 1991 sind die Zeitskalen korrekt in einem relativistischen Kontext definiert.

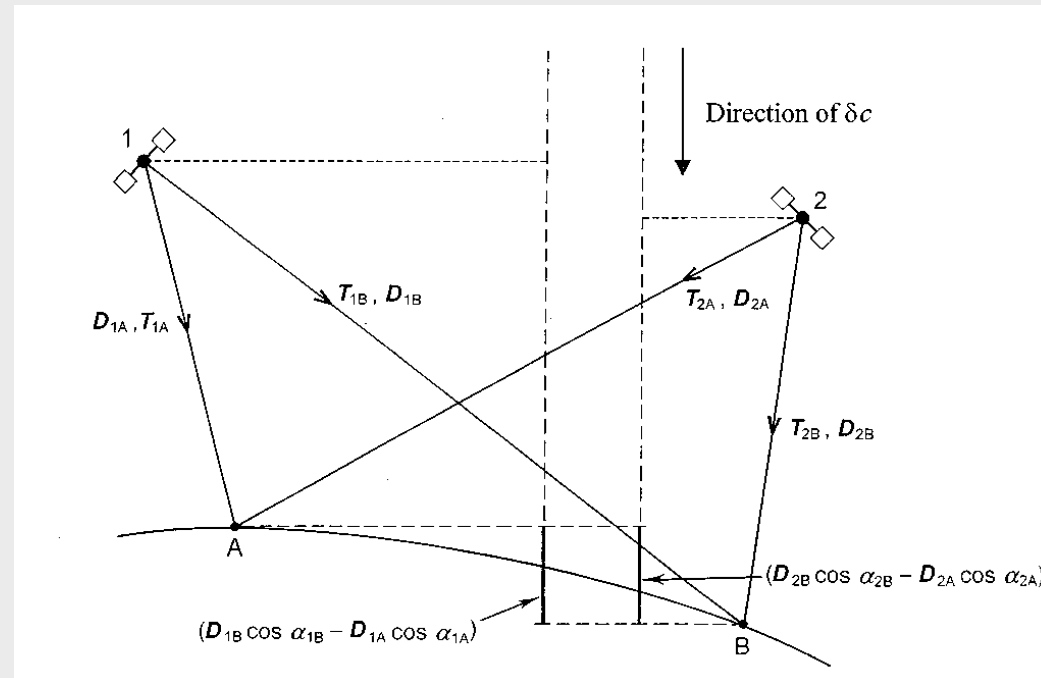
Guinot, B. (2011). Time scales in the context of general relativity. *Phil. trans. Series A, Math., phys., and eng. sciences*, 369, 4131

# Wolf-Petit Experiment

1997: Wolf, P. & Petit, G., *Physical Review A*, 56(6), 4405–4409.  
 “Satellite test of special relativity using the global positioning system.”

## Test der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

$$\delta c/c < 5 \cdot 10^{-9}$$



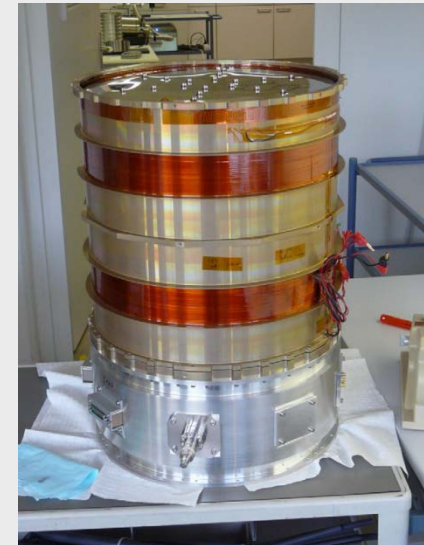
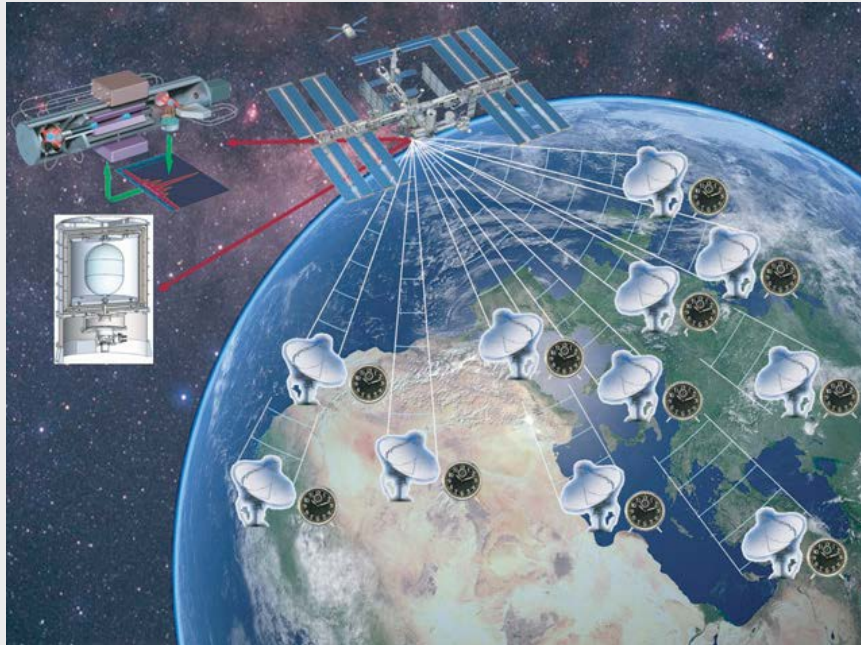
# Inhalt

1. Einführung
2. Atomuhren
3. Vergleich von zwei Atomuhren
4. Vergleich von mehreren Atomuhren
5. Zukunft

# Atomic Clock Ensemble in Space (ACES)

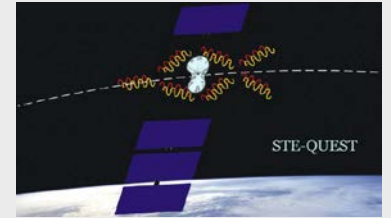
- Verbesserung des Vessot Experiment (25 mal besser)
- Verbesserung des Wolf-Petit Experiment (mehr als 5 mal besser)
- Vergleich von entfernten Atomuhren (100 mal besser)

Abschuss 2014



SHM entwickelt in Neuenburg

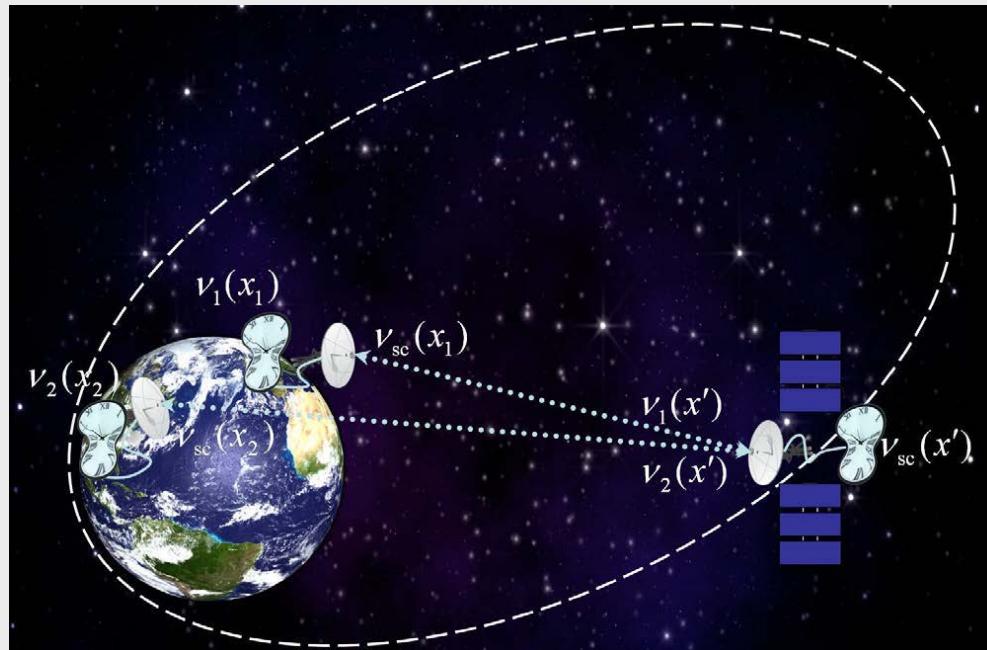
# STE-QUEST



Space-Time Explorer and QUantum Equivalence principle Space Test

Ziele:

1. Gravitationsverschiebung der Erde mit  $10^{-7}$  Unsicherheit
2. Gravitationsverschiebung der Sonne mit  $2 \times 10^{-6}$  Unsicherheit
3. Eötvös Parameter mit  $1.5 \times 10^{-15}$  Unsicherheit



# Schluss

- Die allgemeine Relativitätstheorie findet alltägliche Anwendungen dank GPS.
- Dank Quantenmechanik sind die Atomuhren heutzutage gut genug um die Allgemeine Relativitätstheorie zu testen.
- Atomuhren im All werden noch genauere Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie erlauben, auch im Hinblick auf alternative Theorien.
- Mögliche Anwendungen für Geophysik:  
Bondaescu, R. et al., (2012), *Geophysical J. Int.*, **191**, 78  
“Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping.“

# Referenzen

- Cacciapuoti, L., & Salomon, C. (2009). Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment. *The European Physical Journal Special Topics*, 172(1), 57–68.
- Reynaud, S., Salomon, C., & Wolf, P. (2009). Testing General Relativity with Atomic Clocks. *Space Science Reviews*, 148(1-4), 233–247.
- Mattingly, D. (2005). Modern tests of Lorentz invariance. *Living Rev. Relativity*, 8(5). ([www.livingreviews.org/lrr-2005-5](http://www.livingreviews.org/lrr-2005-5))
- Ashby, N. (2003). Relativity in the global positioning system. *Living Rev. Relativity*, 6(1). ([www.livingreviews.org/lrr-2003-1](http://www.livingreviews.org/lrr-2003-1))
- Will, C. (2006). The confrontation between general relativity and experiment. *Living Rev. Relativity*, 9(3). ([www.livingreviews.org/lrr-2006-3](http://www.livingreviews.org/lrr-2006-3))