

 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"

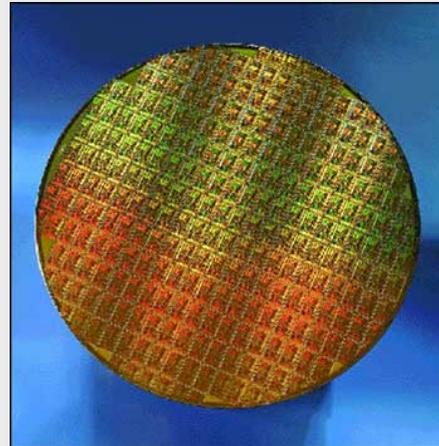
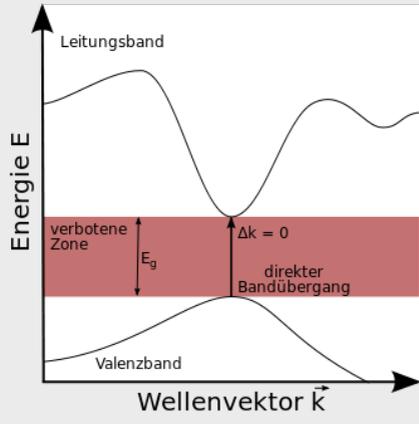
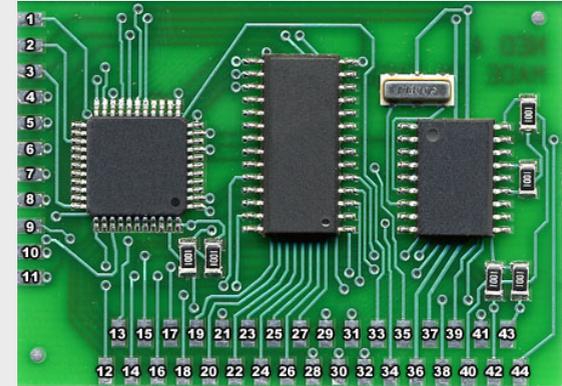
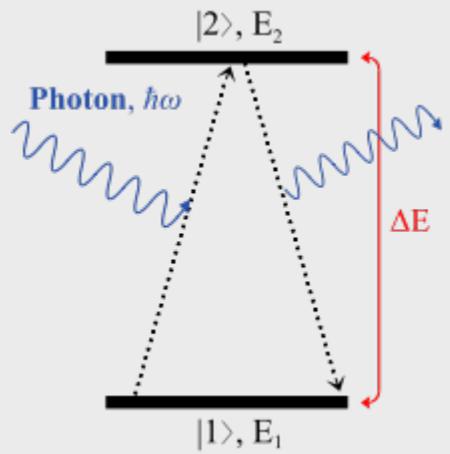
1909: *Physikalische Zeitschrift* **10**: 817–825.

"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	
...	

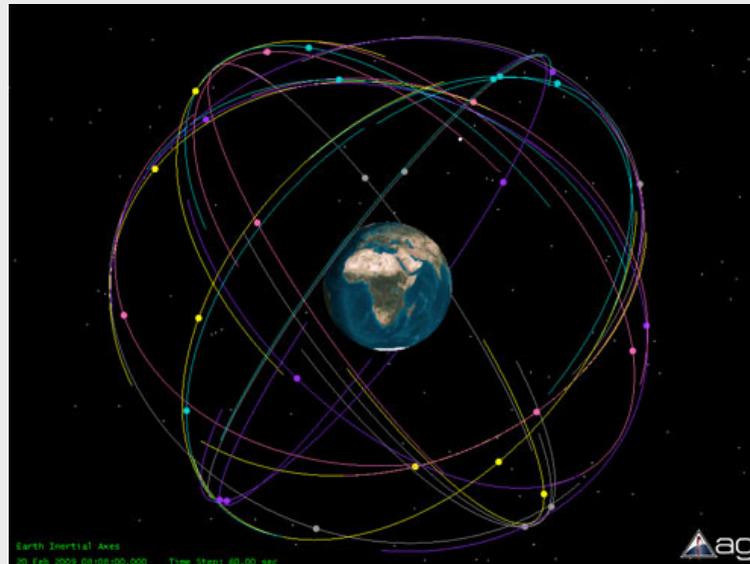
Relativistische Technologie

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



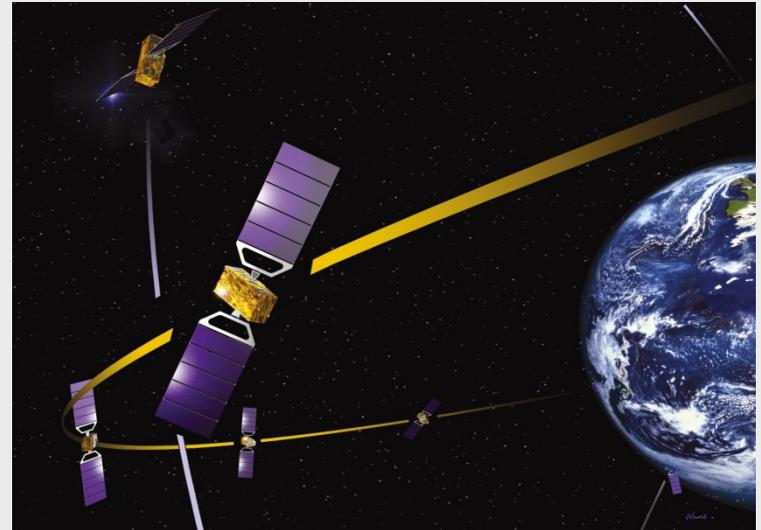
- COMPASS: China, in Vorbereitung – 15 Satelliten



GALILEO

2 erste Satelliten : 21.10.2011

Weitere 2 Satelliten: 12.10.2012



Schweizerische Atomuhren auf GALILEO Satelliten

Rubidium Uhren



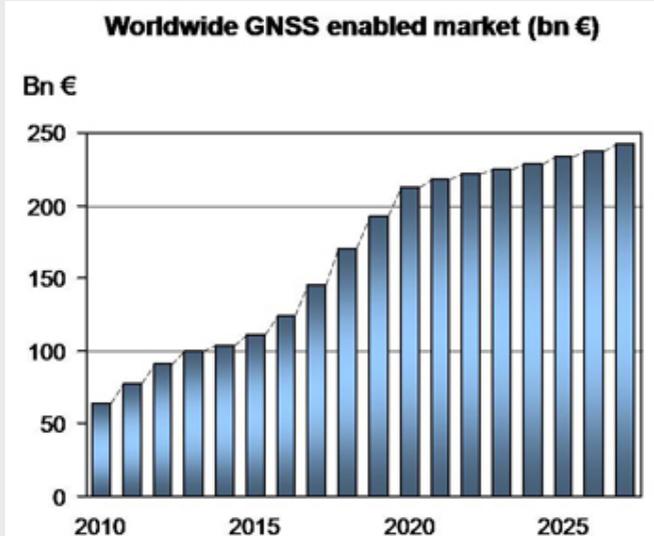
Passiv Wasserstoff Maser



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

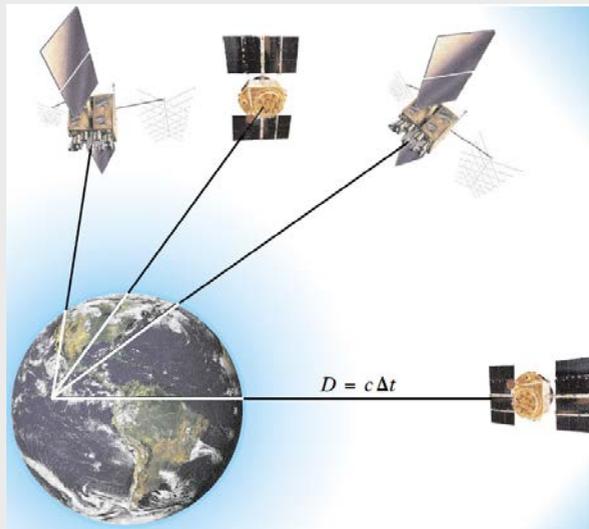
GPS: Abstände messen

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:

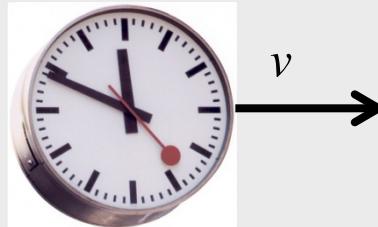
*Das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang
zwischen den beiden Hyperfeinstrukturturniveaus des
Grundzustandes von Atomen des Nuklids ¹³³Cs entsprechenden
Strahlung.*



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

Relativistische Effekte

- Relativistischer Dopplereffekt



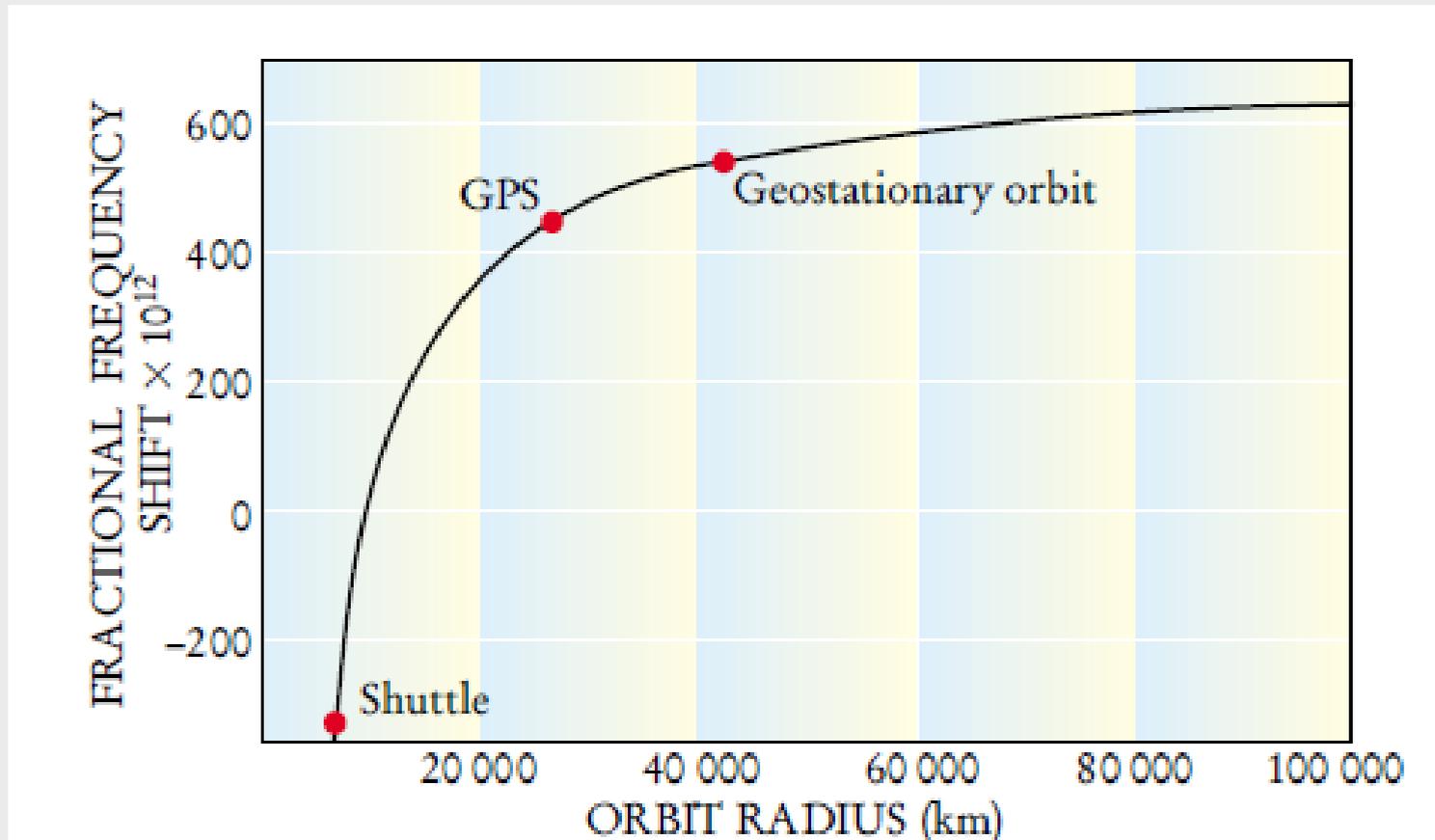
v	$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v^2}{2c^2}$
4 km/s	-10^{-10}
13 m/s	-10^{-15}

- Gravitation Frequenzverschiebung



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

Relativitätseffekte auf GPS Uhren

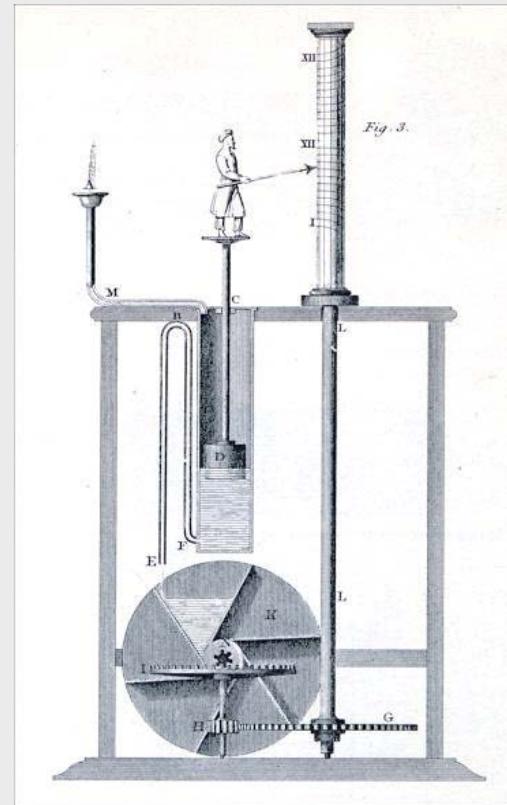
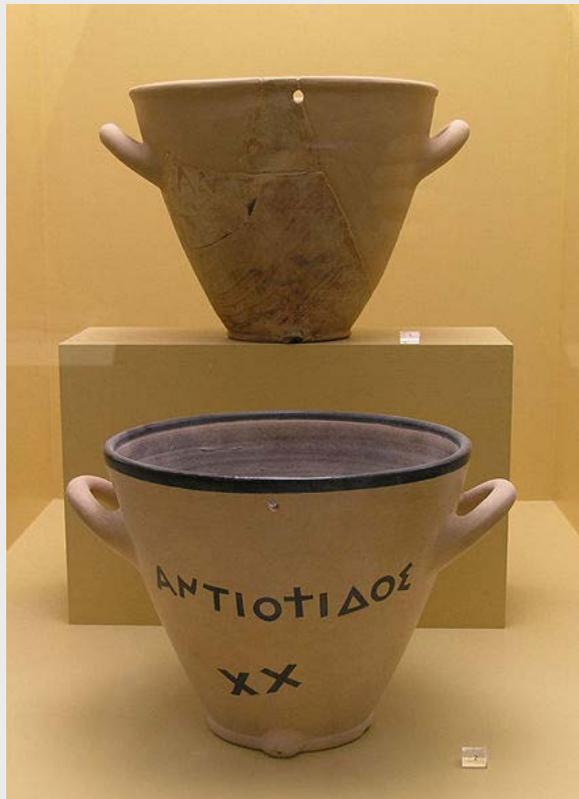


Inhalt

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

Primitiven Uhren

Wasseruhr

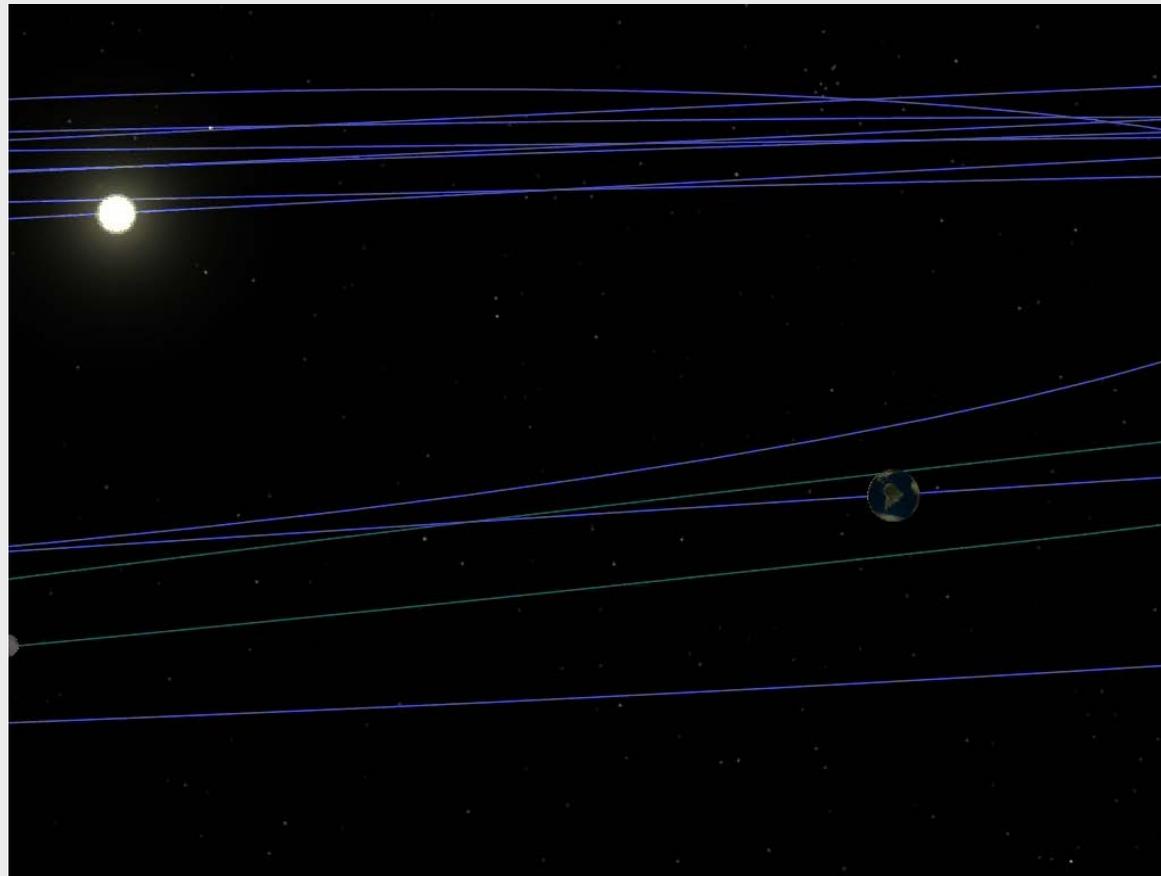


Kerze



Nur Zeitintervalle werden gemessen

Astronomische Uhren



Periodische Bewegungen

Erdumdrehung um ihre Achse

→

Tage

Monddrehung um die Erde

→

Monate

Erddrehung um die Sonne

→

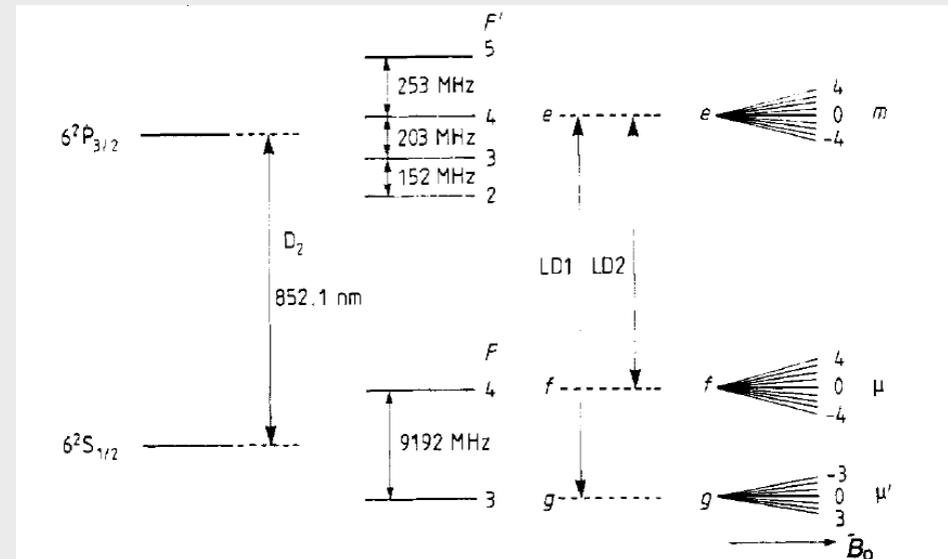
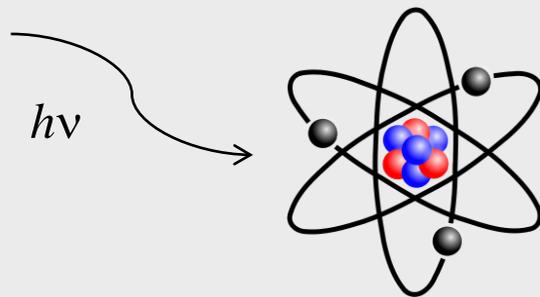
Jahre

Atomuhren

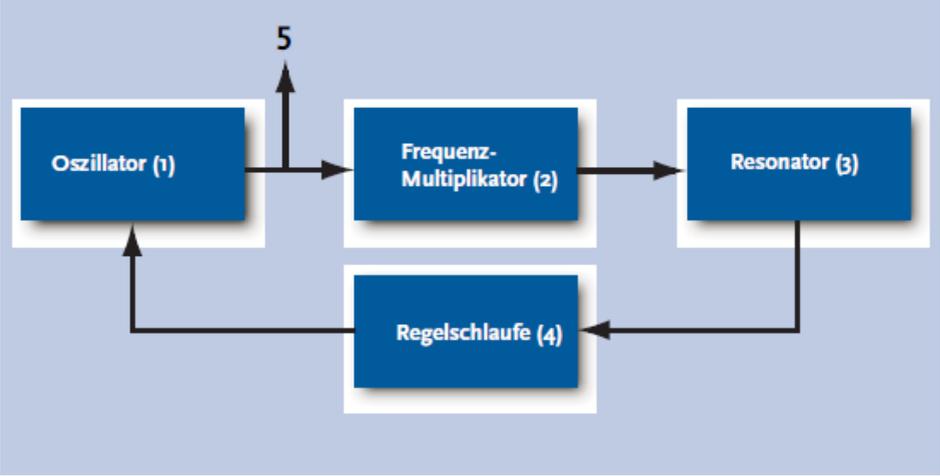
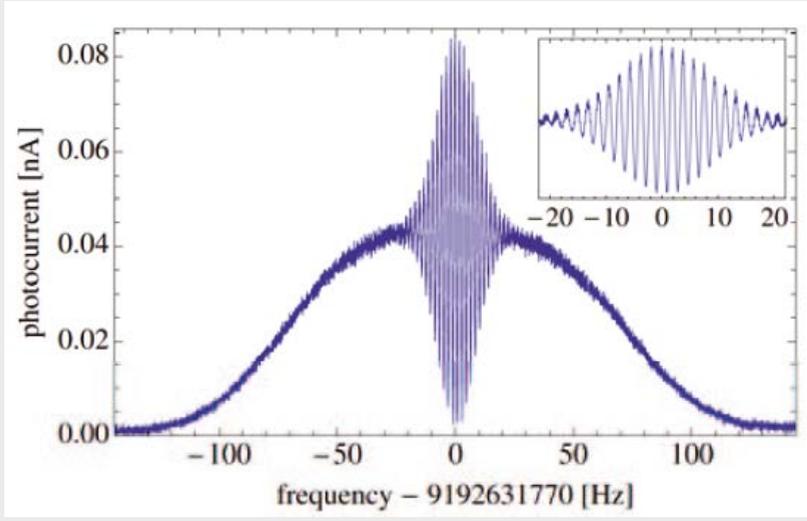
Atomare Übergänge als Referenz für Frequenz

- Universale Eigenschaften
- Hohe Frequenz

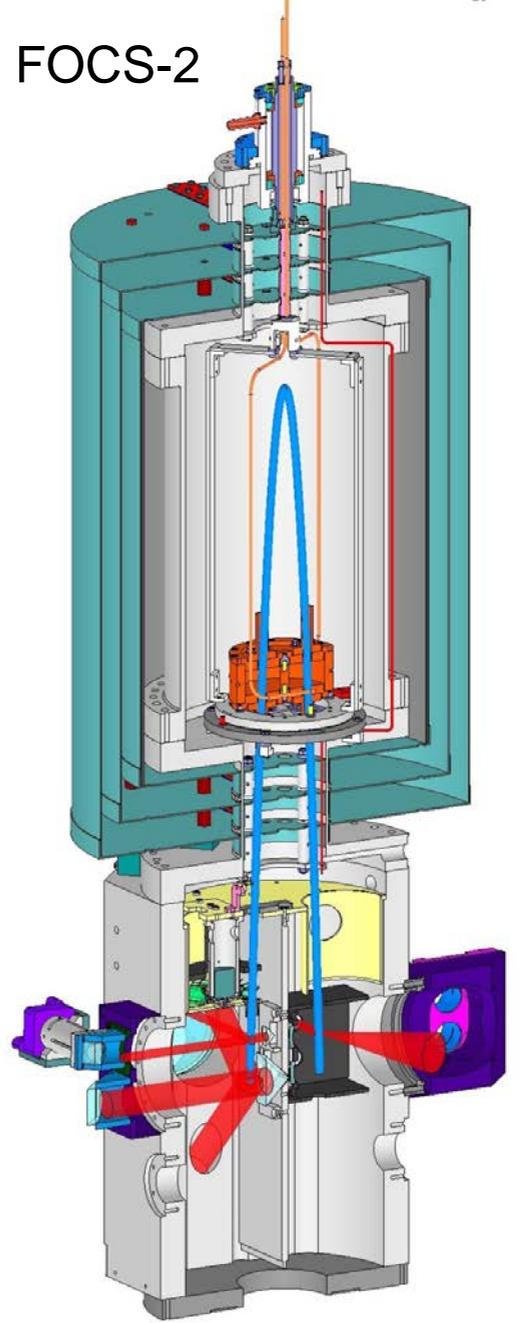
Idealerweise mit einem einzigen Atom



Cäsium Frequenznormal



FOCS-2

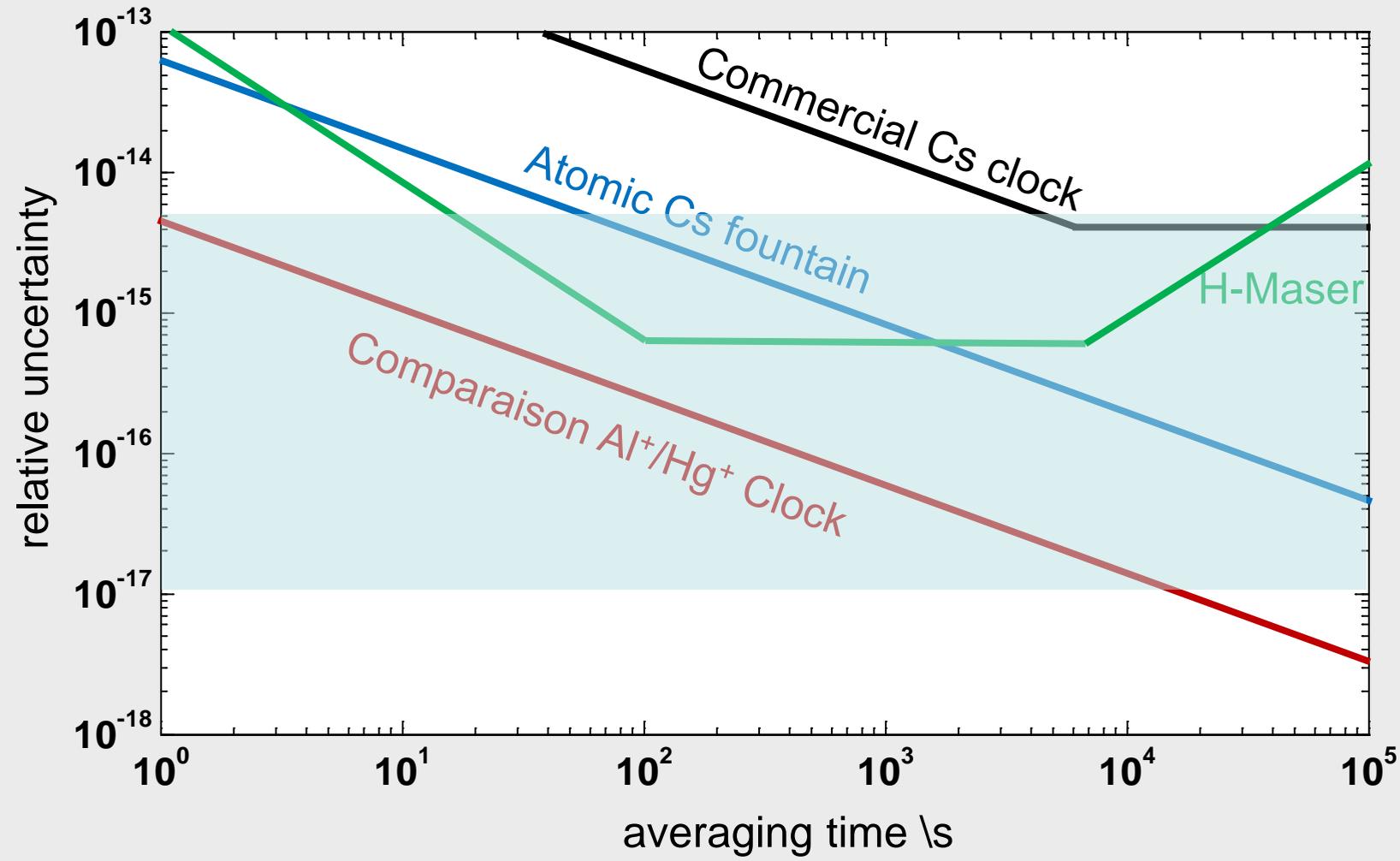


Unsicherheitsbudget

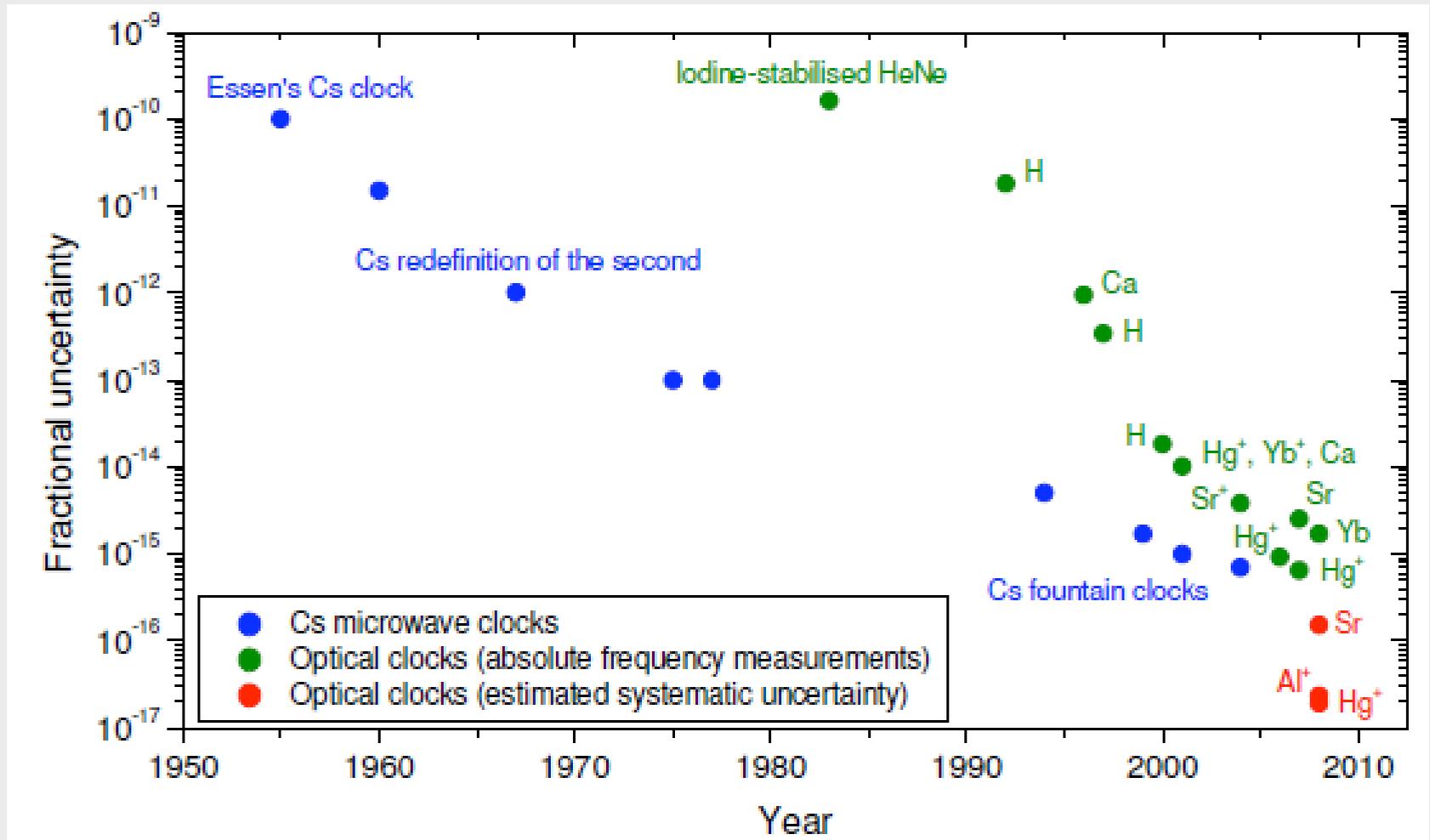
Source of uncertainty in 10 ⁻¹⁵	Bias	Uncertainty
Corrected Biases		
Second order Zeeman	25.40	0.20
Blackbody radiation	-16.12	0.44
Gravitational shift	59.67	0.23
End to end Cavity	1.70	0.90
Non corrected Biases		
2nd order Doppler	-0.03	0.03
DC Electric Field	-0.01	0.01
Passive Cavity pulling	<	0.10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

Stabilität

Relativistische
Experimente auf der
Erdoberfläche



Genauigkeit



Inhalt

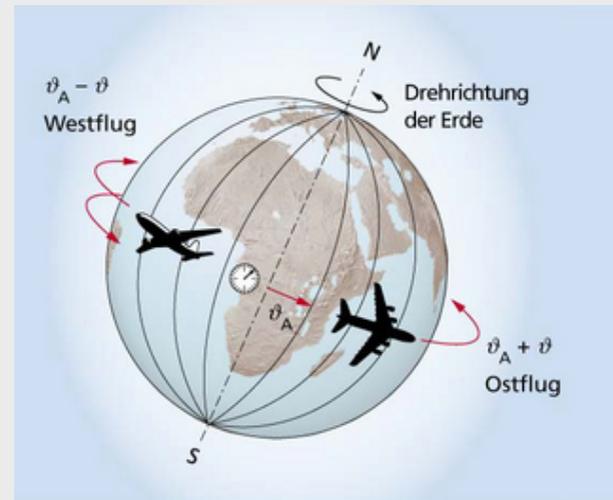
1. Einführung
2. Atomuhren
3. Vergleich von zwei Atomuhren
4. Vergleich von mehreren Atomuhren
5. Zukunft

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

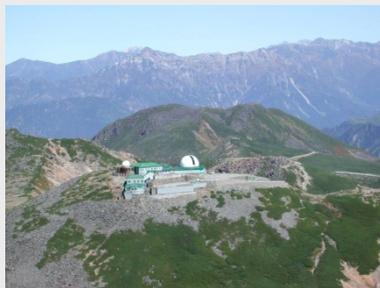
Iijima-Fujiwara Experiment

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

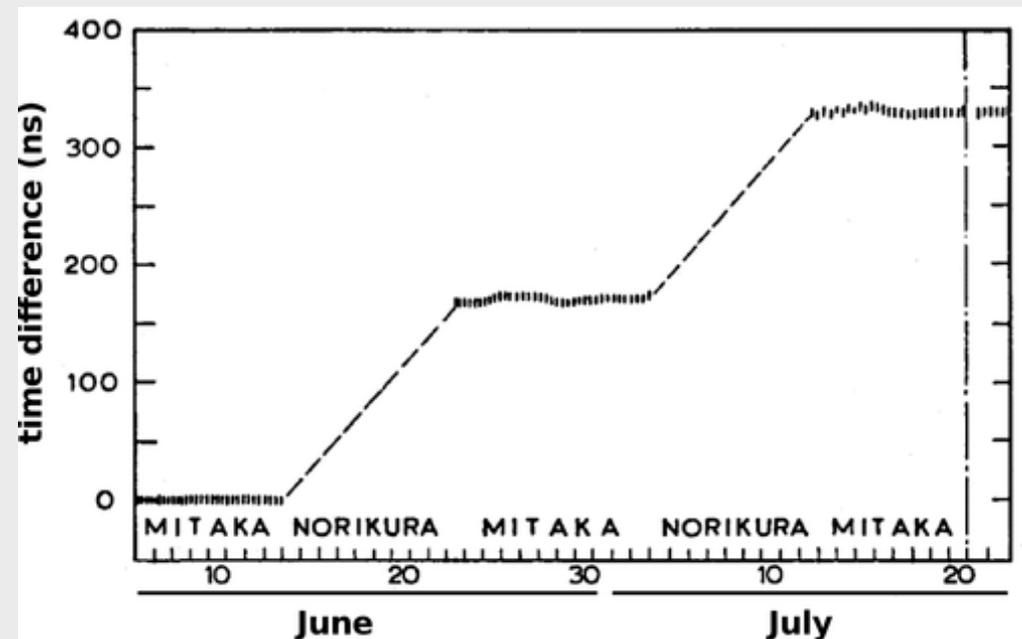
“An experiment for the potential blue shift at the Norikura Corona Station.”



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.”

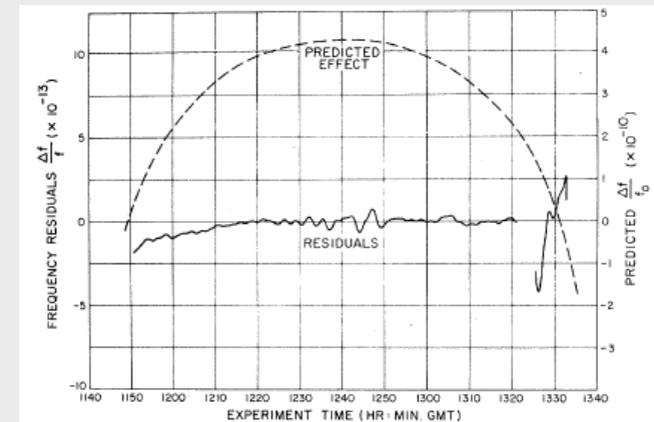
“Gravity Probe A”

Raketenantriebener Flug bis eine Höhe von 10000 km

Senkrecht freier Fall während fast 2 Stunden.



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

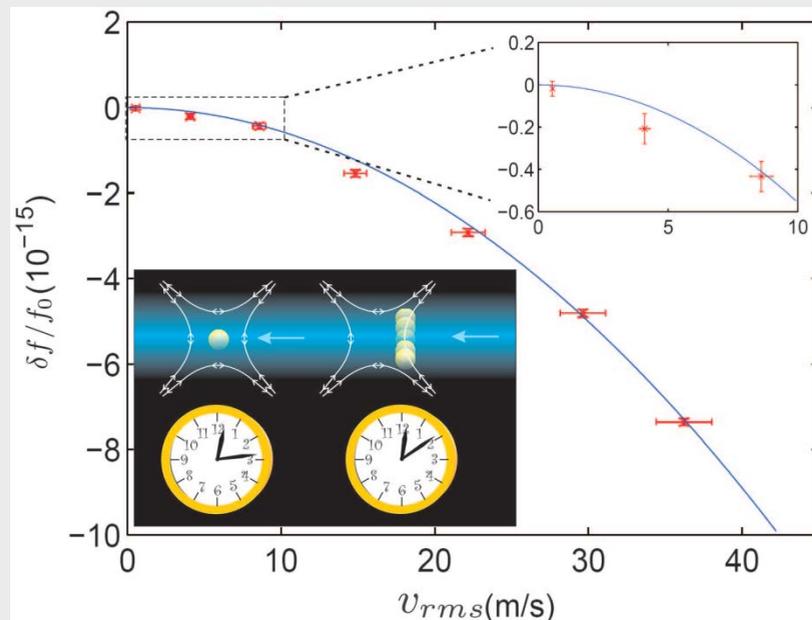


Die Theorie ist bestätigt mit 70×10^{-6} Unsicherheit.

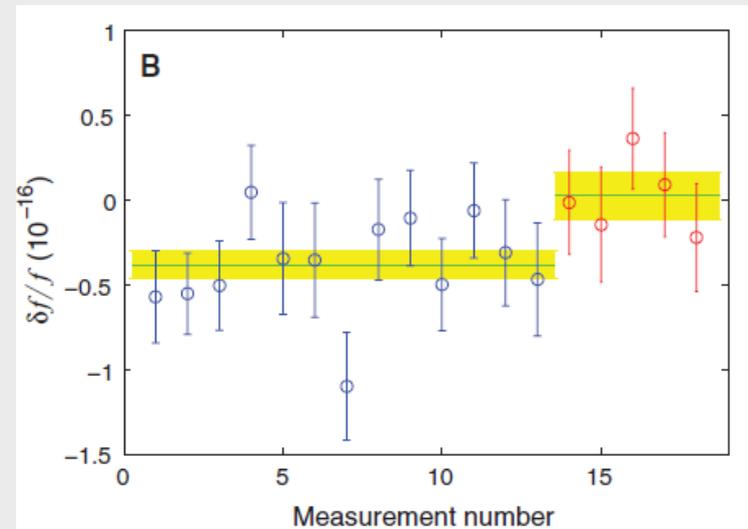
Chou Experiment

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

Vergleich von zwei optischen Al⁺ 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:

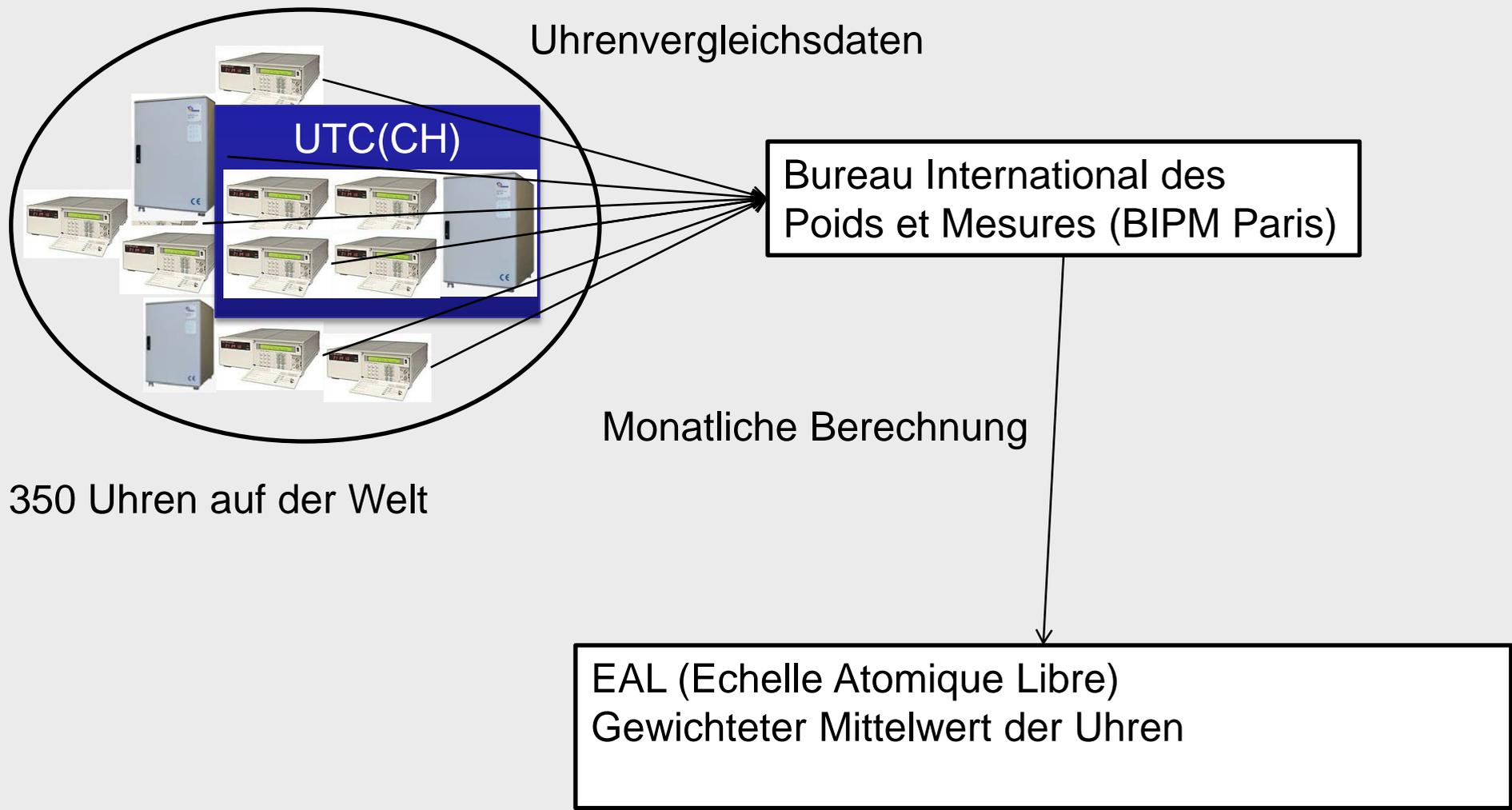
Verschiedene Bezugssysteme (Erde, Sonne) + Kontinuität:

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

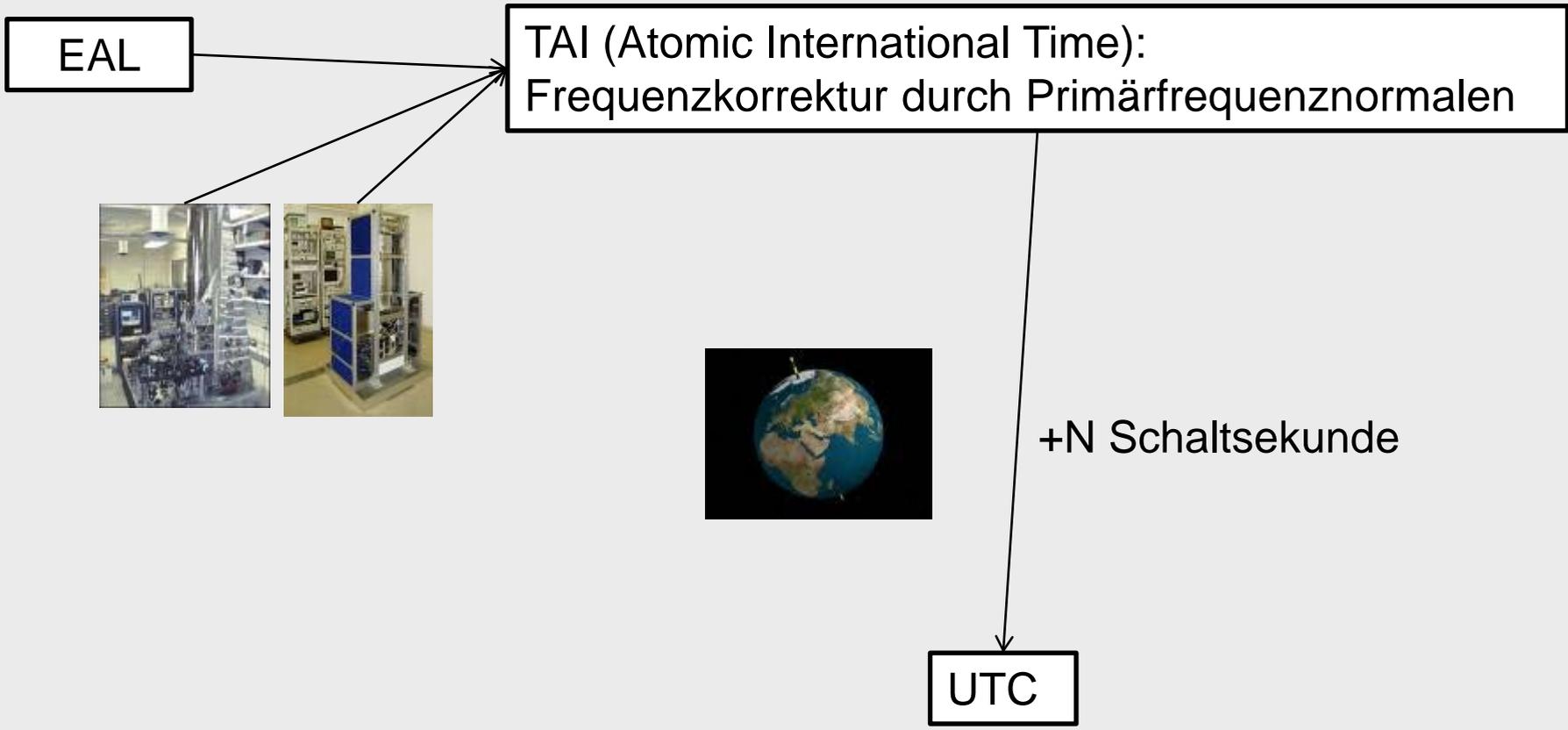
Alle:

Stabilität, Verfügbarkeit, im Einklang mit Sonnenzeit : UTC

UTC (1)



UTC (2)



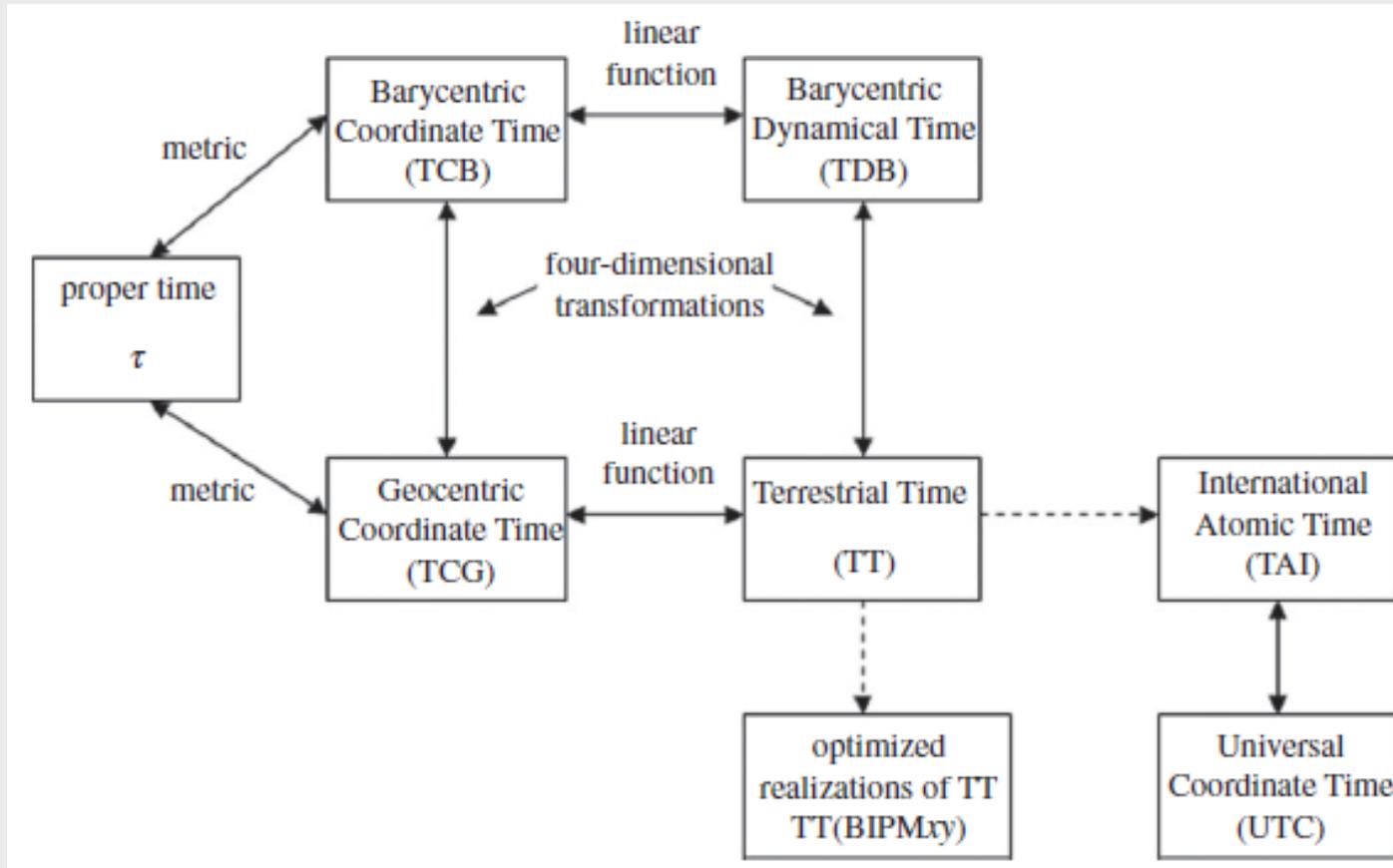
Institute die zu UTC beitragen

Mitwirkende Länder: 51

Mitwirkende Institute: 68



Viele Zeitskalen



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

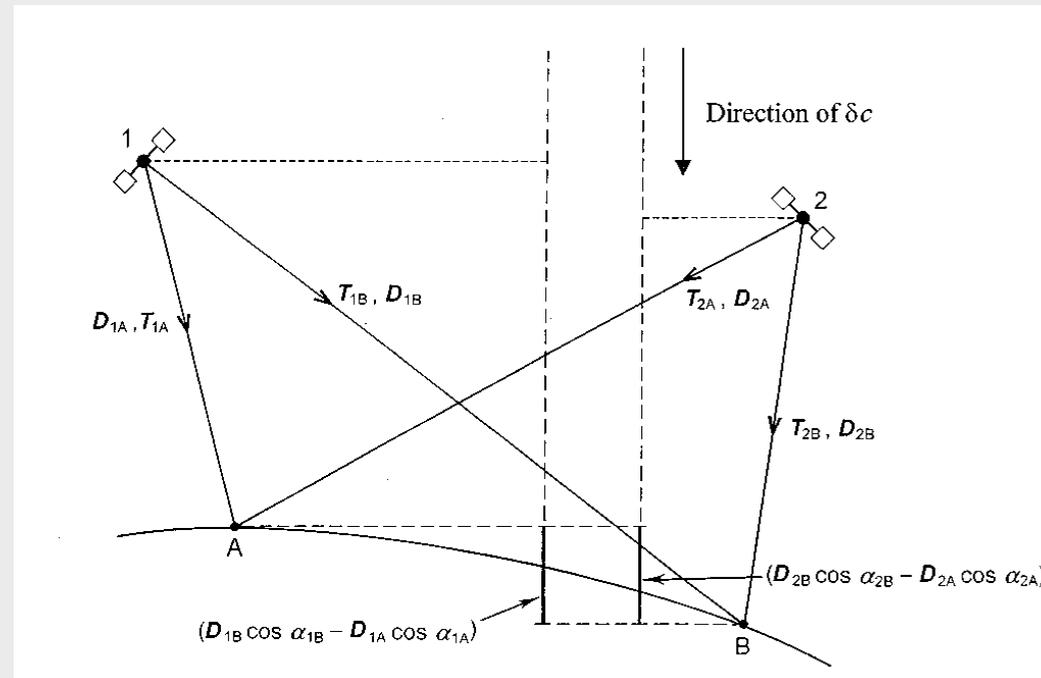
Guinot, B. (2011). Time scales in the context of general relativity. *Phil. trans. Series A, Math., phys., and eng. sciences*, 369, 4131

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

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



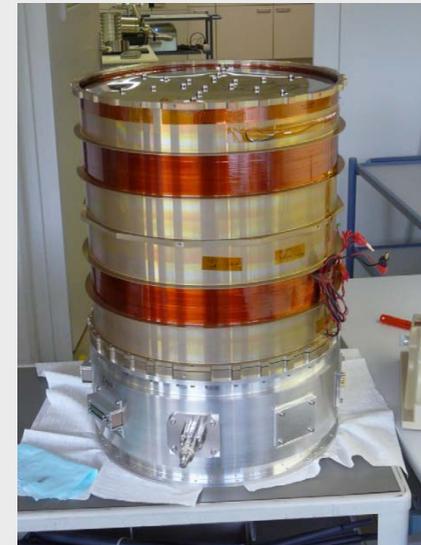
Inhalt

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

Atomic Clock Ensemble in Space (ACES)

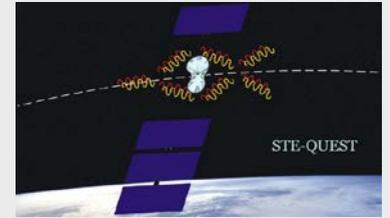
- Verbesserung des Vessot Experiment (25 mal besser)
- Verbesserung des Wolf-Petit Experiment (mehr als 5 mal besser)
- Vergleich von entfernten Atomuhren (100 mal besser)

Abschuss 2014



SHM entwickelt in Neuenburg

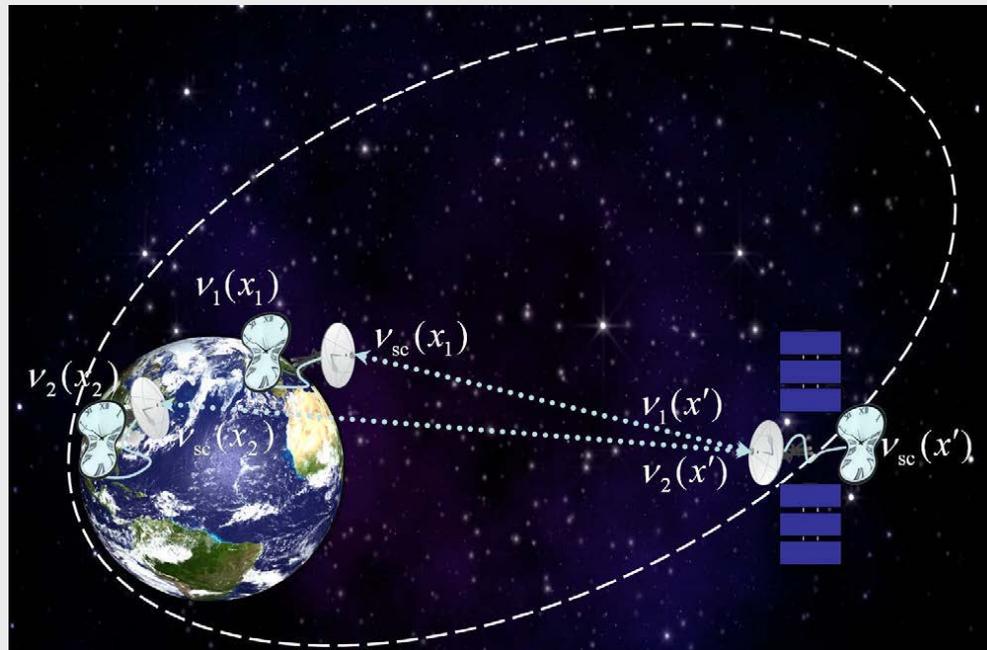
STE-QUEST



Space-Time Explorer and QUantum Equivalence principle Space Test

Ziele:

1. Gravitationsverschiebung der Erde mit 10^{-7} Unsicherheit
2. Gravitationsverschiebung der Sonne mit 2×10^{-6} Unsicherheit
3. Eötvös Parameter mit 1.5×10^{-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)
- Ashby, N. (2003). Relativity in the global positioning system. *Living Rev. Relativity*, 6(1). (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)