

Ein moderner optischer Test der speziellen Relativitätstheorie

Markus Jakobi

Seminar Moderne Optik

(WiSe 2007/08)

03.12.2007

Gliederung

1. SRT & ihre experimentellen Stützen
2. Warum ein verbessertes MM-Experiment?
3. Das aktuelle Experiment
4. Resümee

SRT & ihre experimentellen Stützen

Die Postulate

Einstein, 1905:

Äquivalenzprinzip

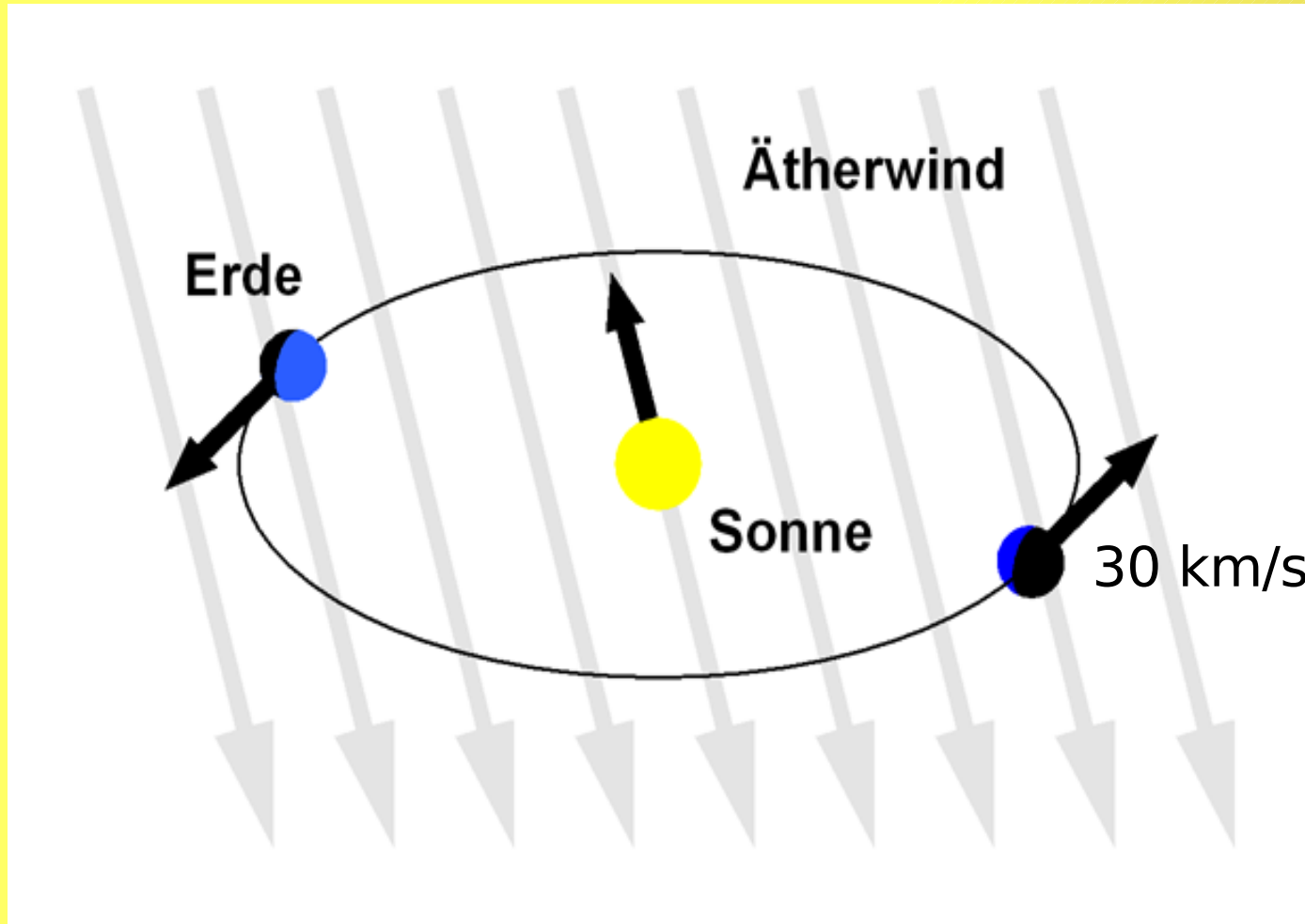
Alle Inertialsysteme sind bezüglich aller Gesetze der Physik gleichberechtigt.

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum hat immer und überall den konstanten Wert c .

SRT & ihre experimentellen Stützen

Der Äther



Bewegung von Erde und Sonne zum Äther.
Abb. von Wikipedia, Stichwort Äther.

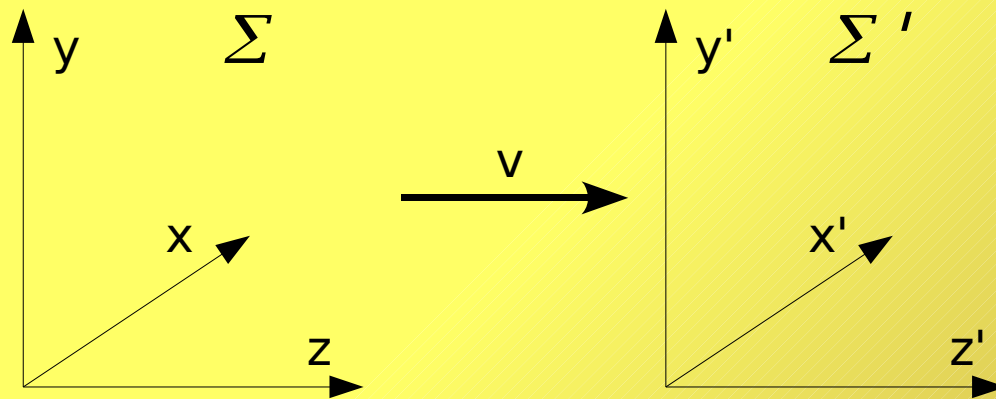
SRT & ihre experimentellen Stützen

Die Transformation

Bisher:

Galilei-Transformation

$$\begin{aligned}t' &= t \\x' &= x \\y' &= y \\z' &= z - vt\end{aligned}$$



SRT & ihre experimentellen Stützen

Die Transformation

Bisher:

Galilei-Transformation

$$\begin{aligned}t' &= t \\x' &= x \\y' &= y \\z' &= z - vt\end{aligned}$$

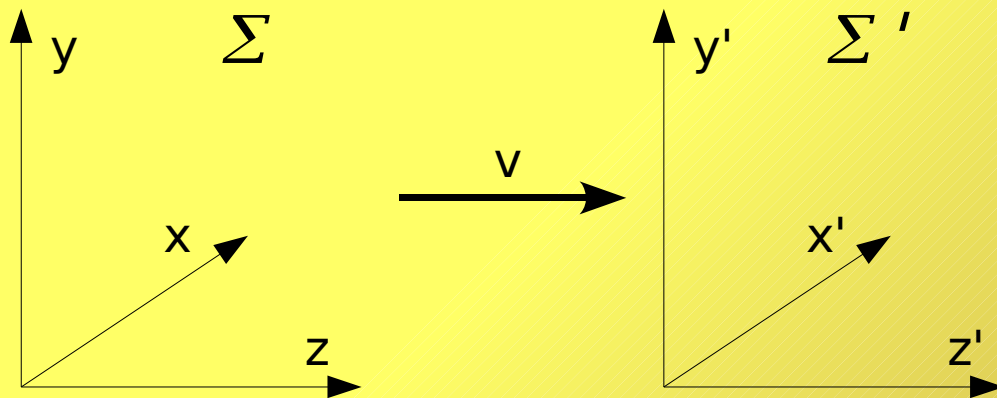
Physikalisch korrekt:
Lorentz-Transformation

$$t' = \gamma \left(t - v \frac{z}{c^2} \right)$$

$$x' = x$$

$$y' = y$$

$$z' = \gamma (z - vt)$$

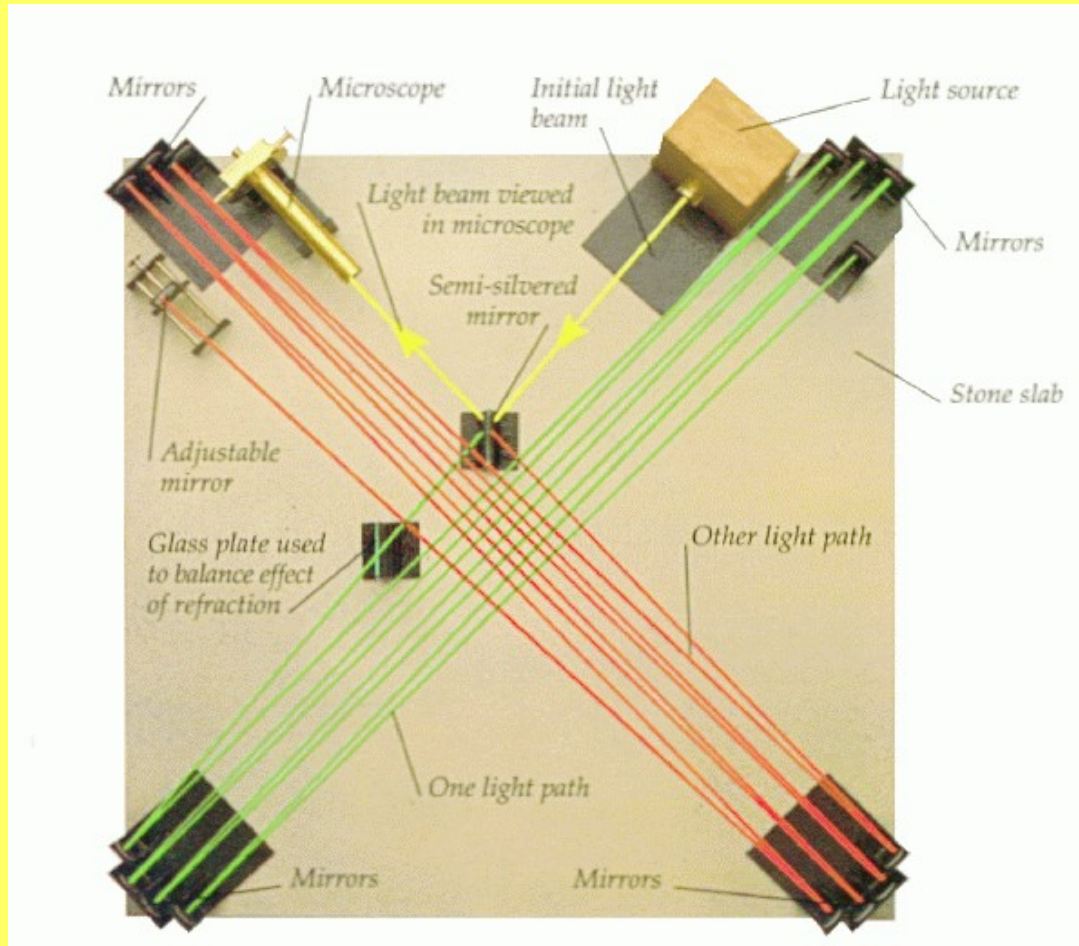


bewegte Uhren gehen um γ langsamer

bewegte Maßstäbe erscheinen in Bewegungsrichtung um γ verkürzt

SRT & ihre experimentellen Stützen

Das klassische MM-Experiment

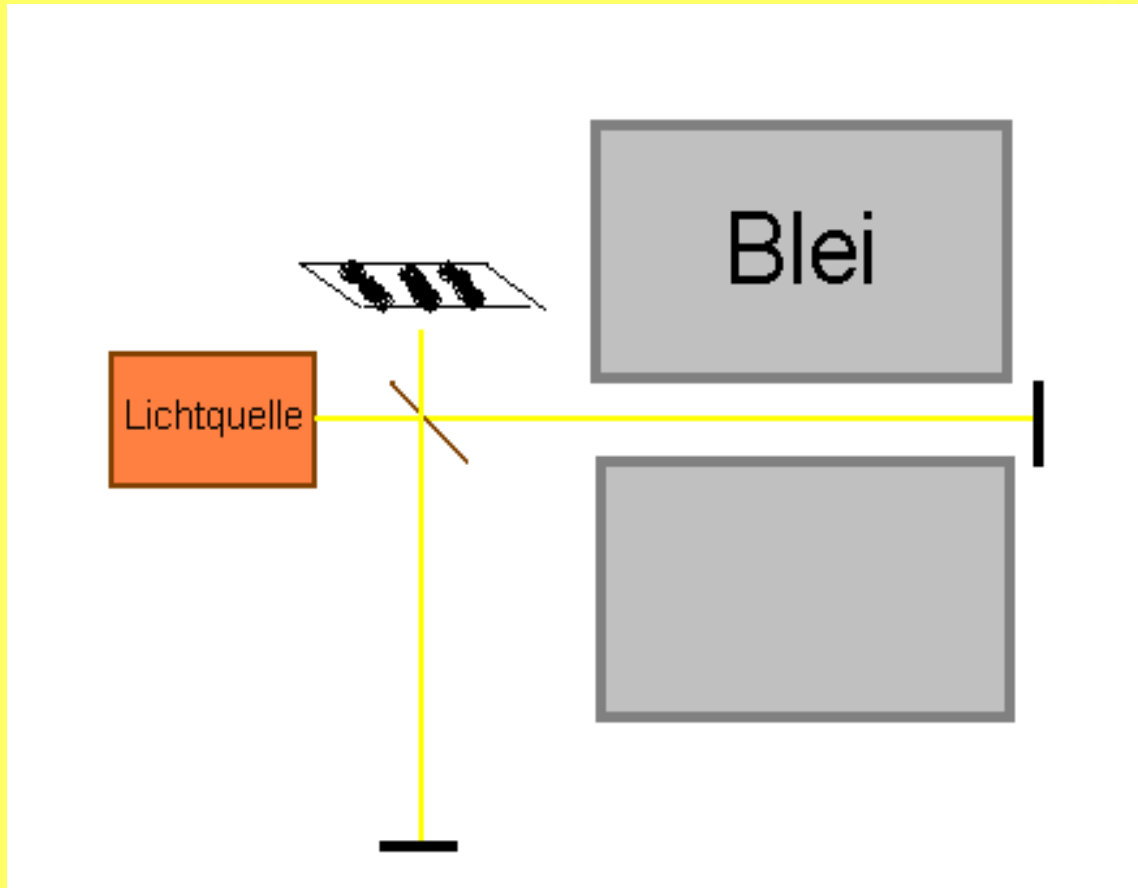


- Messung der Anisotropie der Lichtausbreitung
- unverträglich mit bisheriger Ätherhypothese

Michelson-Morley-Experiment, 1887, Cleveland/Ohio.
Abb. von <http://br.geocities.com/paradoxosdafisica/>.

SRT & ihre experimentellen Stützen

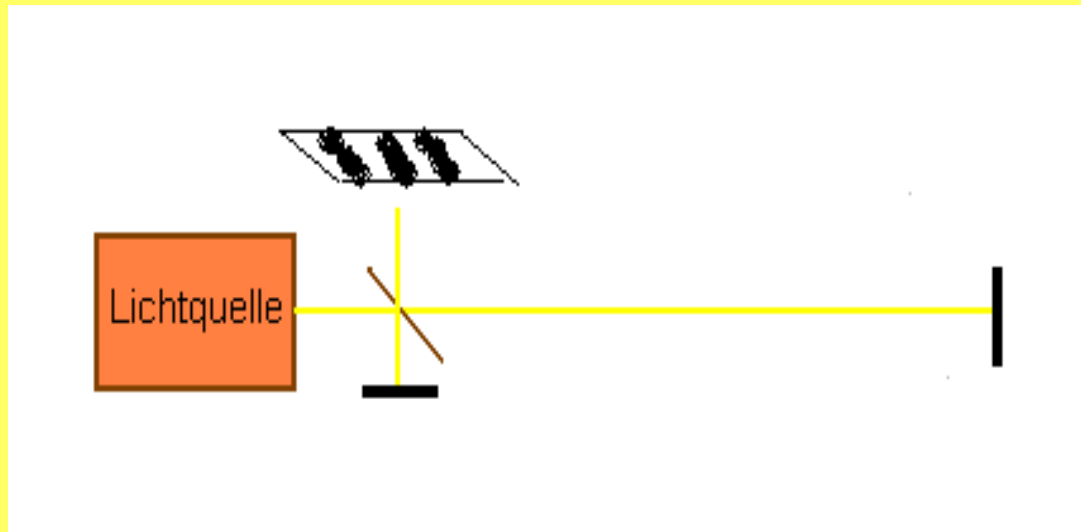
Das Hammar-Experiment



- MM mit Bleiabschirmung eines Arms
- Mitführung des Äthers durch massive Körper widerlegt
- konsistent mit SRT

SRT & ihre experimentellen Stützen

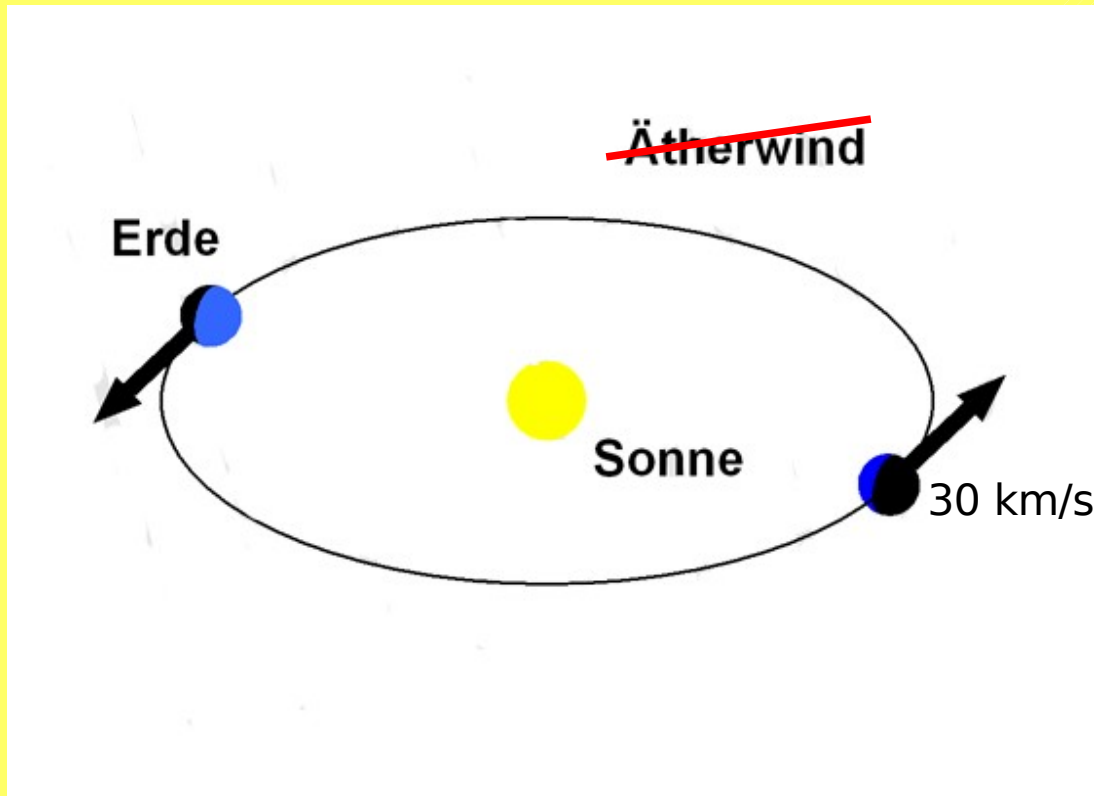
Das Kennedy-Thorndike-Experiment



- MM mit unterschiedlichen Armlängen
- Boost-Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit
- Vergleich von Zeitdilatation und Längenkontraktion

SRT & ihre experimentellen Stützen

Heutiges Bild

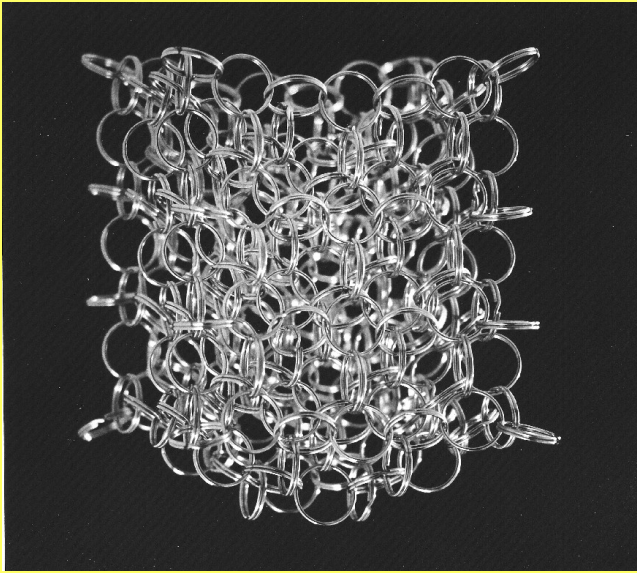


Bewegung von Erde und Sonne zum Äther.
Abb. von Wikipedia, Stichwort Äther.

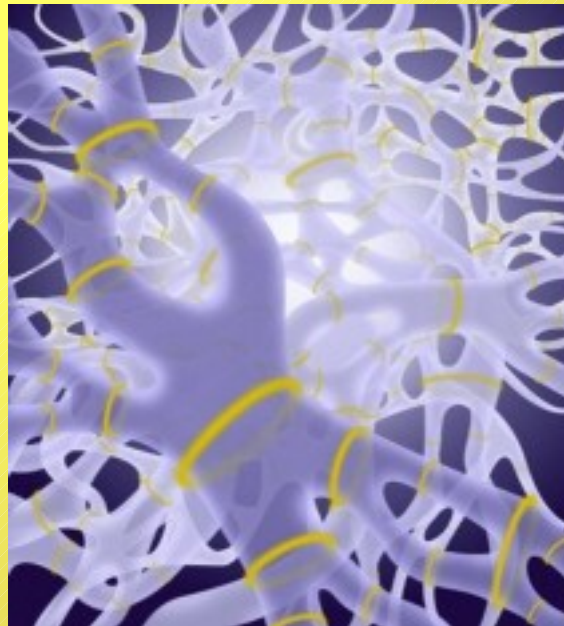
- es existiert kein Äther
- Licht breitet sich unabhängig von irgendeinem ausgezeichneten IS aus
- Es existieren weder absoluter Raum noch absolute Zeit
- Lorentztransformation uneingeschränkt gültig

Warum ein verbessertes MM-Experiment?

Die Theorie

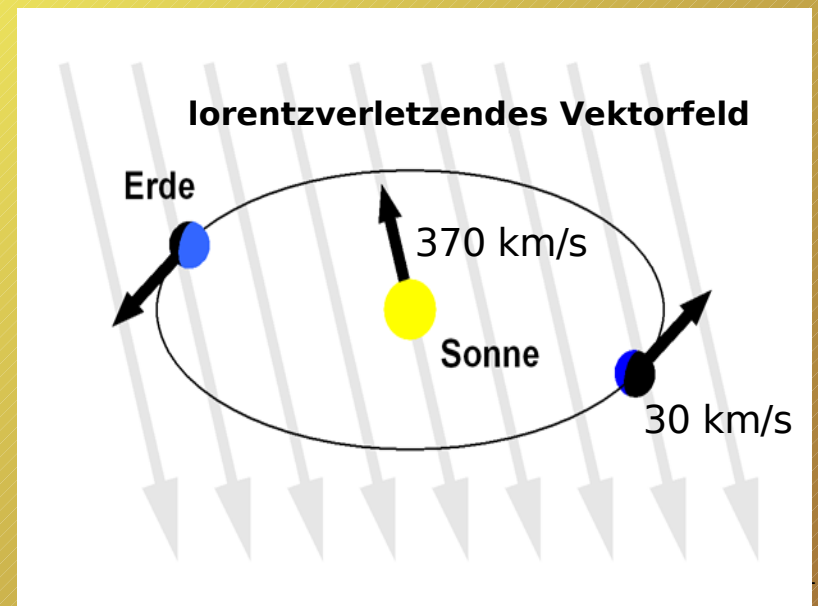


Die Raumzeit der Quantum loop theory. Abb. von Carlo Rovelli, CPT, Marseille.



String-Weltflächen, Abb. von Webpräsentation S.Schiller, Uni Düsseldorf

- SRT Grundlage für moderne Physik
- Modelle der Stringtheorie und Quanten Loop Theorie lassen kleine Lorentzverletzungen vermuten



Warum ein verbessertes MM-Experiment?

Einordnung des Messergebnisses

Robertson-Mansouri-Sexl

Allgemeinster linearer nur geschwindigkeitsabh. Ansatz:

$$t' = (1 + \alpha v^2/c^2 + \dots) t - e(v) x$$

$$x' = (1 + \beta v^2/c^2 + \dots) (x - vt)$$

$$y' = (1 + \delta v^2/c^2 + \dots) y$$

$$z' = (1 + \delta v^2/c^2 + \dots) z$$

SRT für $\alpha = -1/2$, $\beta = 1/2$ und $\delta = 0$.

Relat. Dopplereffekt: $\alpha = -1/2 \pm 8.4 \times 10^{-8}$
(Reinhard & al., Nature Physics, 11.11.07)

Kennedy-Thorndike: $\alpha - \beta + 1$

Michelson-Morley: $\beta - \delta - 1/2$

Standard Model Extension

Lorentzverletzende Terme zum Standard-Model-Lagrangian hinzuaddiert:

$$L = -\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \frac{1}{2} (k_{AF})^\kappa \epsilon_{\kappa\lambda\mu\nu} A^\lambda F^{\mu\nu} - \frac{1}{4} (k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu} F^{\kappa\lambda} F^{\mu\nu}$$

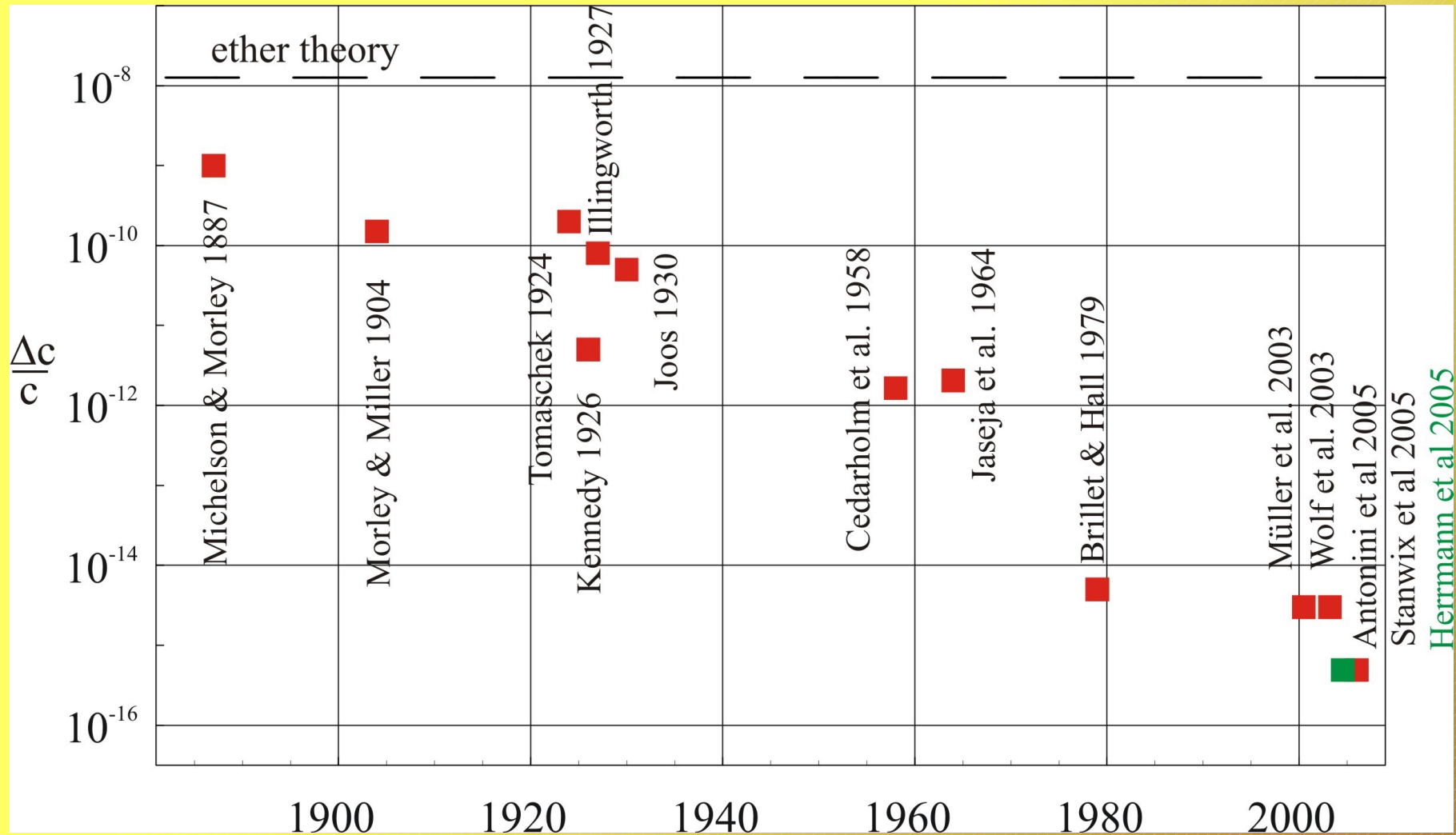
19 freie Parameter in k-Matrizen

10 durch astrophysikalische Messungen auf $< 2 \times 10^{-32}$ beschränkt.

9 können nur durch Labor-experimente wie MM bestimmt werden.

Das aktuelle Experiment

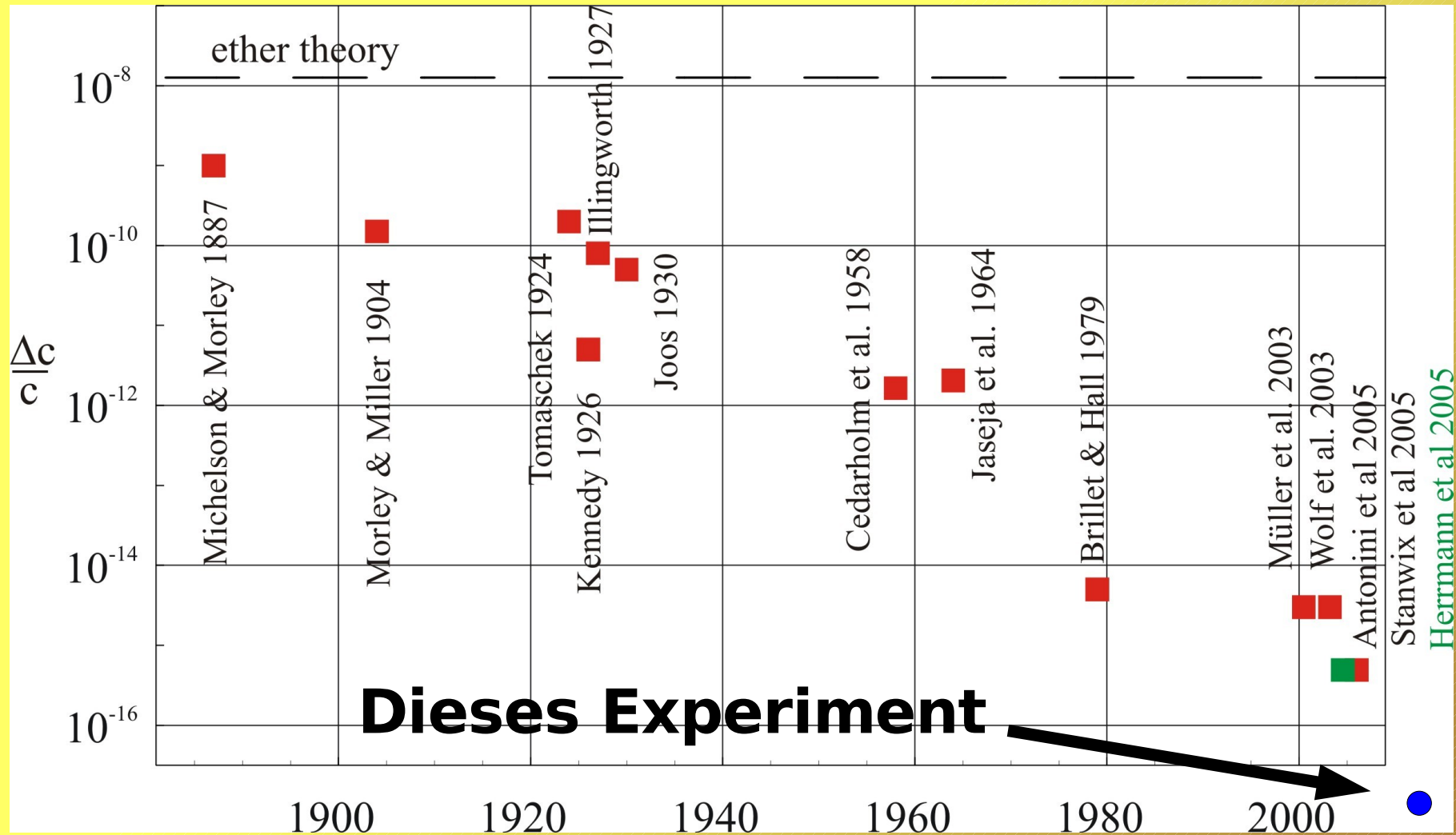
Historische Entwicklung



Obere Schranken für die Anisotropie des Lichtes. Aus [3].

Das aktuelle Experiment

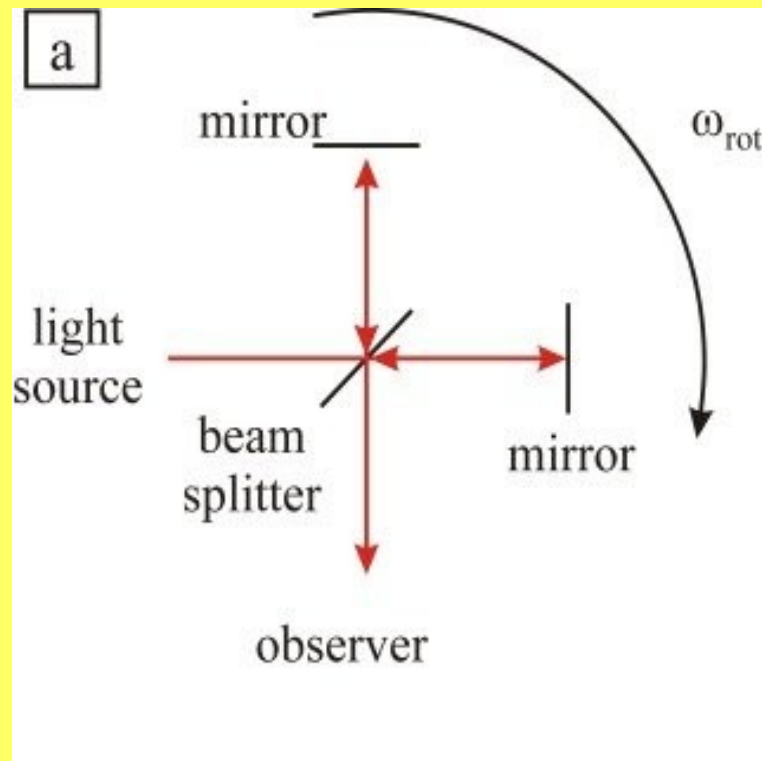
Historische Entwicklung



Obere Schranken für die Anisotropie des Lichtes. Aus [3].

Das aktuelle Experiment

Vergleich von alt und neu

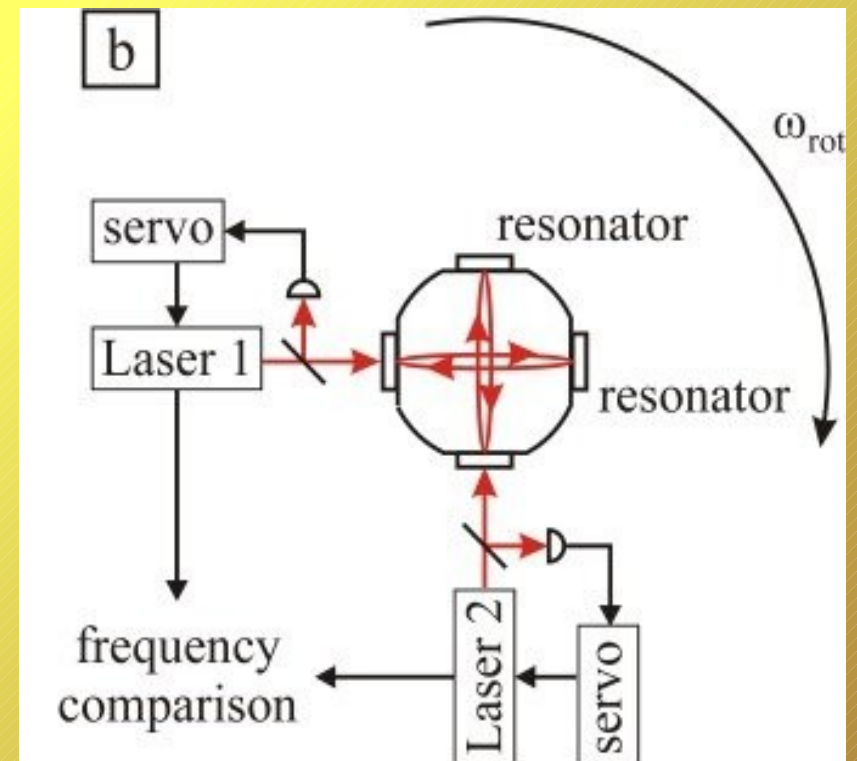
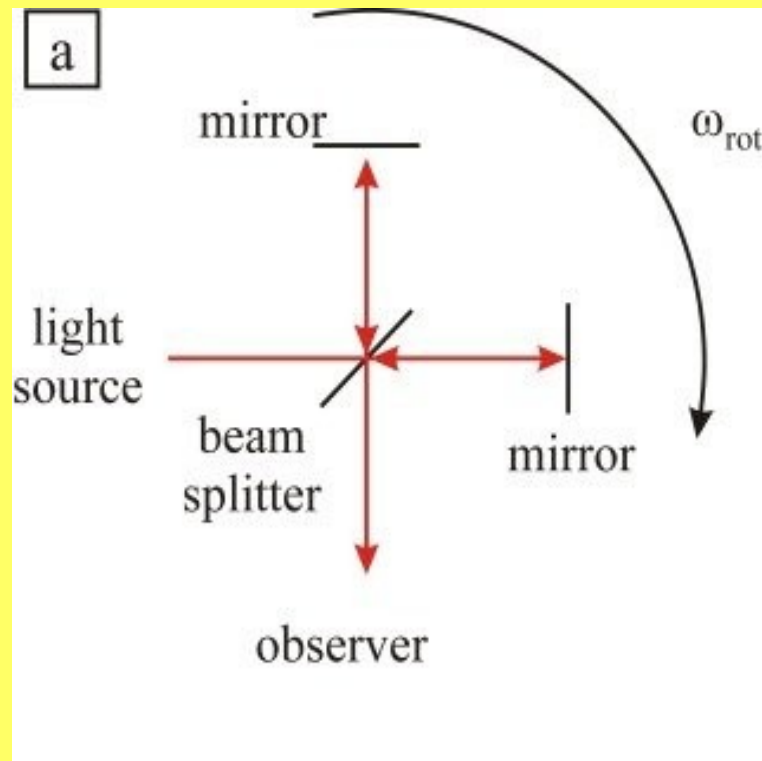


Klassisches MM-Experiment:

- Lichtstrahl wird aufgespalten
- zwei senkrecht orientierte Interferometerarme
- Zusammenführen der Lichtstrahlen auf Schirm gibt (stationäre) Interferenzfigur
- Drehung der Anordnung

Das aktuelle Experiment

Vergleich von alt und neu

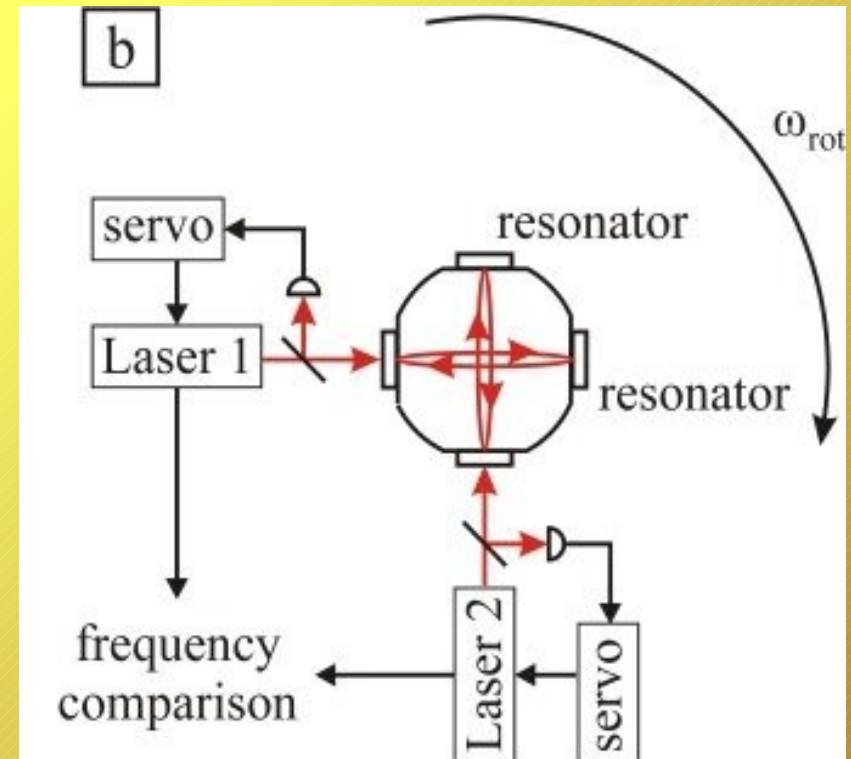


Das aktuelle Experiment

Vergleich von alt und neu

- Laserresonatoren ersetzen die Arme des Interferometers
- Zwei Nd:YAG auf die Resonatoren stabilisiert mittels elektrischer Rückkopplung
- Messung der Schwebungsfrequenz

$$\Delta \nu = \nu_1 - \nu_2$$



Das aktuelle Experiment

Die Resonatoren

Frequenzstabilisierung von Lasern

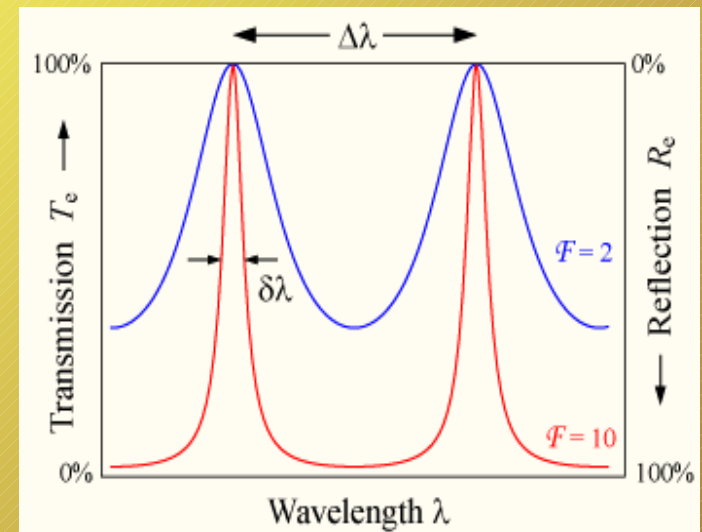
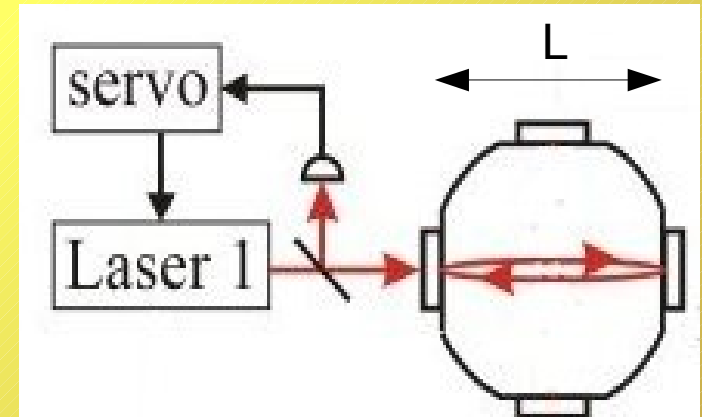
Resonanzfrequenz des Resonators: $\nu = \frac{c}{2L} n$
 $\lambda = 2L / n$

Def. der Finesse: $F = \frac{\delta \lambda}{\Delta \lambda} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}$

Im Resonanzfall sinkt reflektierte Intensität, die mit PD gemessen wird.

Automatisches Durchstimmen der Laserfrequenz auf Resonanz.

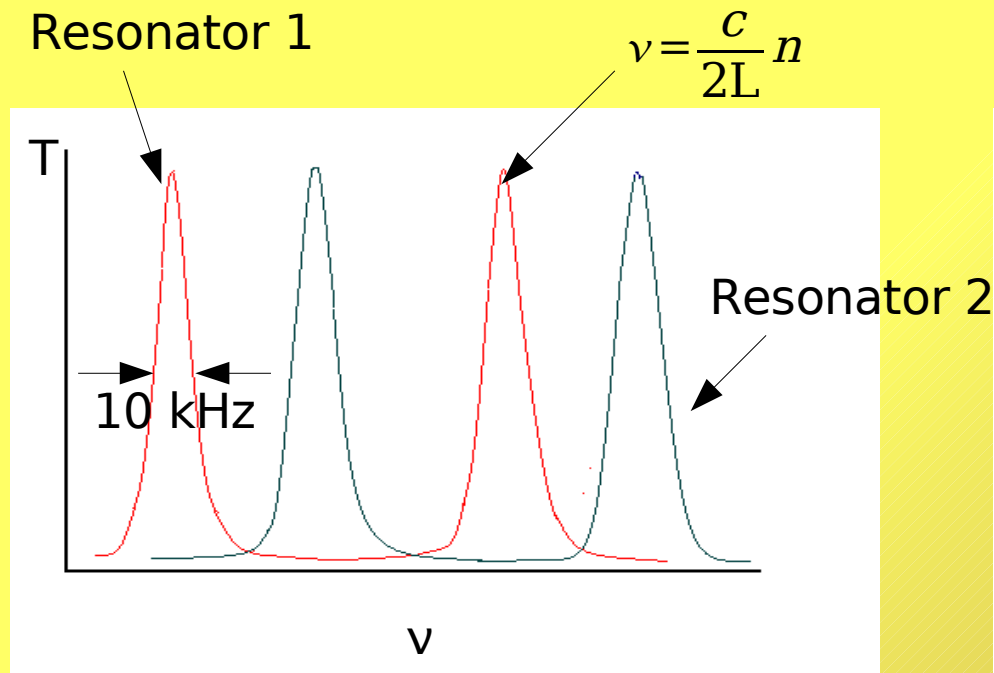
$$\nu_0 = 2,82 \times 10^{14} \text{ Hz} \quad \frac{c}{2L} = 2,7 \times 10^9 \text{ Hz}$$



Transmission beim Fabry-Pérot-Etalon.
Von Wikipedia,
Fabry-Pérot-interferometer [en]

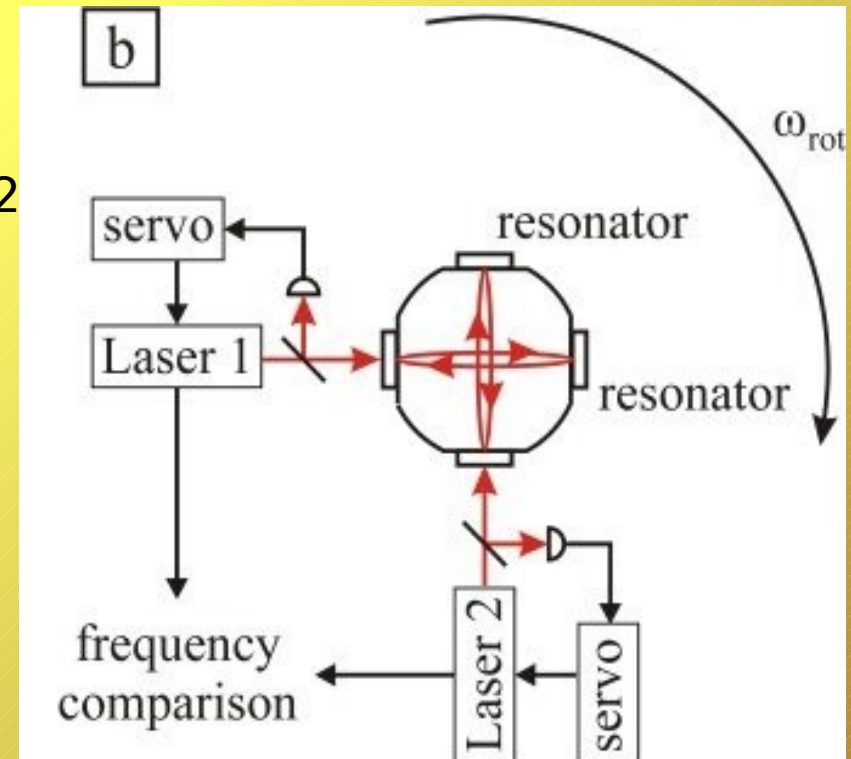
Das aktuelle Experiment

Messerwartung



Messung der Schwebungsfrequenz in Abhängigkeit des Rotationswinkels:

$$\frac{\Delta c(\omega_{rot} t)}{c} = \frac{\Delta \nu(\omega_{rot} t)}{\nu_0}$$



Das aktuelle Experiment

Messerwartung

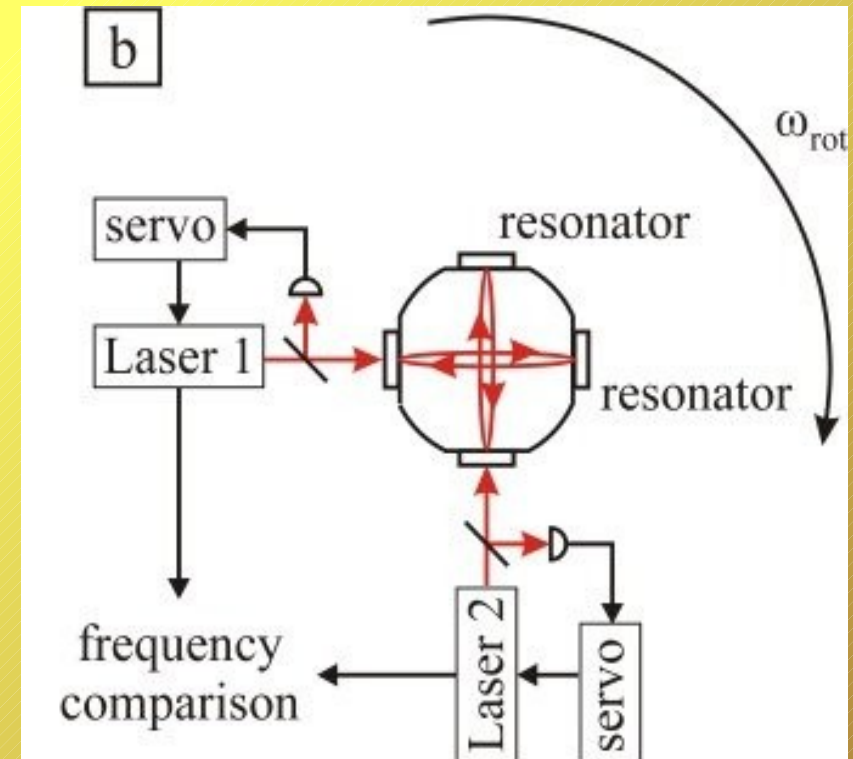
Rotation der Resonatoren führt nach 180° auf physikalisch äquivalente Situation.

$$\frac{\Delta c(\omega_{rot} t)}{c} = B \sin(2 \omega_{rot} t) + C \cos(2 \omega_{rot} t)$$

Amplituden nicht konstant:

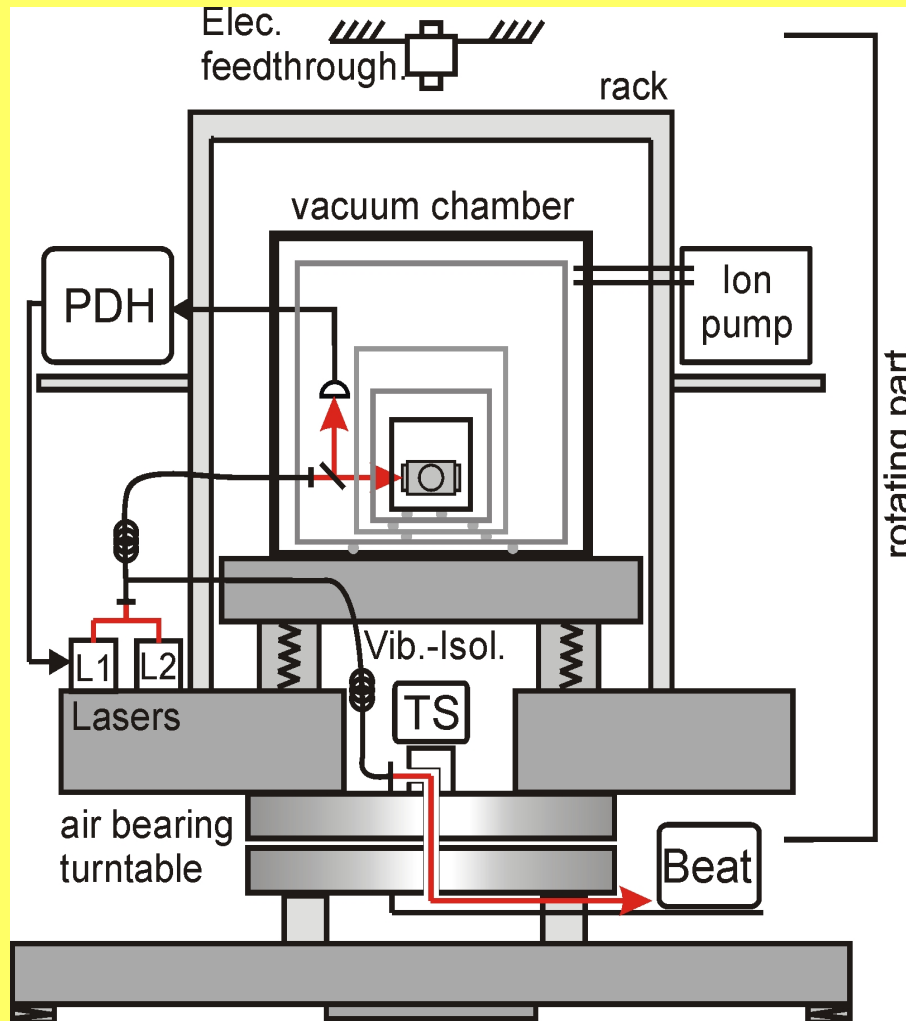
$$B = B_0 + B_{s1} \sin(\omega_E t) + B_{c1} \cos(\omega_E t) + B_{s2} \sin(2 \omega_E t) + B_{c2} \cos(2 \omega_E t)$$

$$C = C_0 + C_{s1} \sin(\omega_E t) + C_{c1} \cos(\omega_E t) + C_{s2} \sin(2 \omega_E t) + C_{c2} \cos(2 \omega_E t)$$



Das aktuelle Experiment

Experimenteller Aufbau

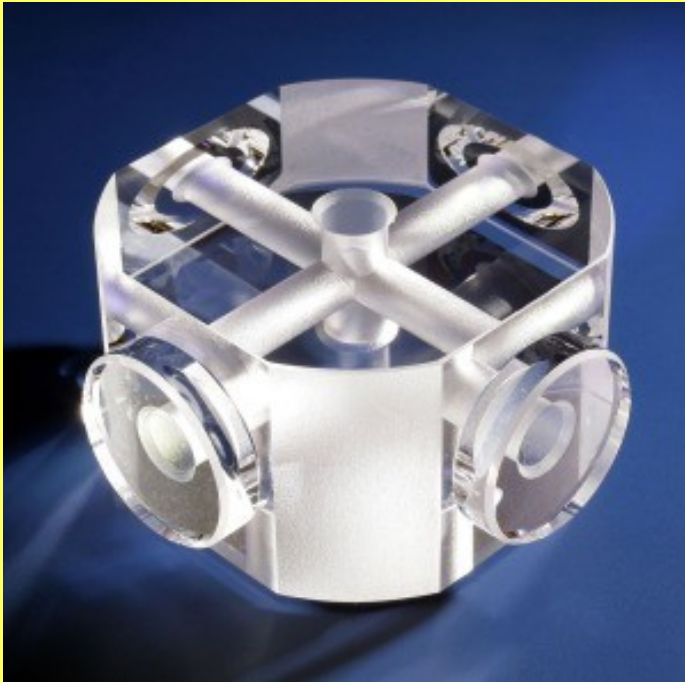


- Thermische Isolierung
- Anordnung in Vakuumkammer ($<10^{-5}$ mbar)
- mit aktiver Vibrationsdämpfung ausgerüstet
- Kontrolle der Verkippung ($<1\mu\text{rad}$)
- auf Präzisionsdrehtisch platziert

Schematischer Aufbau,
AG Metrologie und Quantenoptik, HU-Berlin

Das aktuelle Experiment

Ausführung der Resonatoren

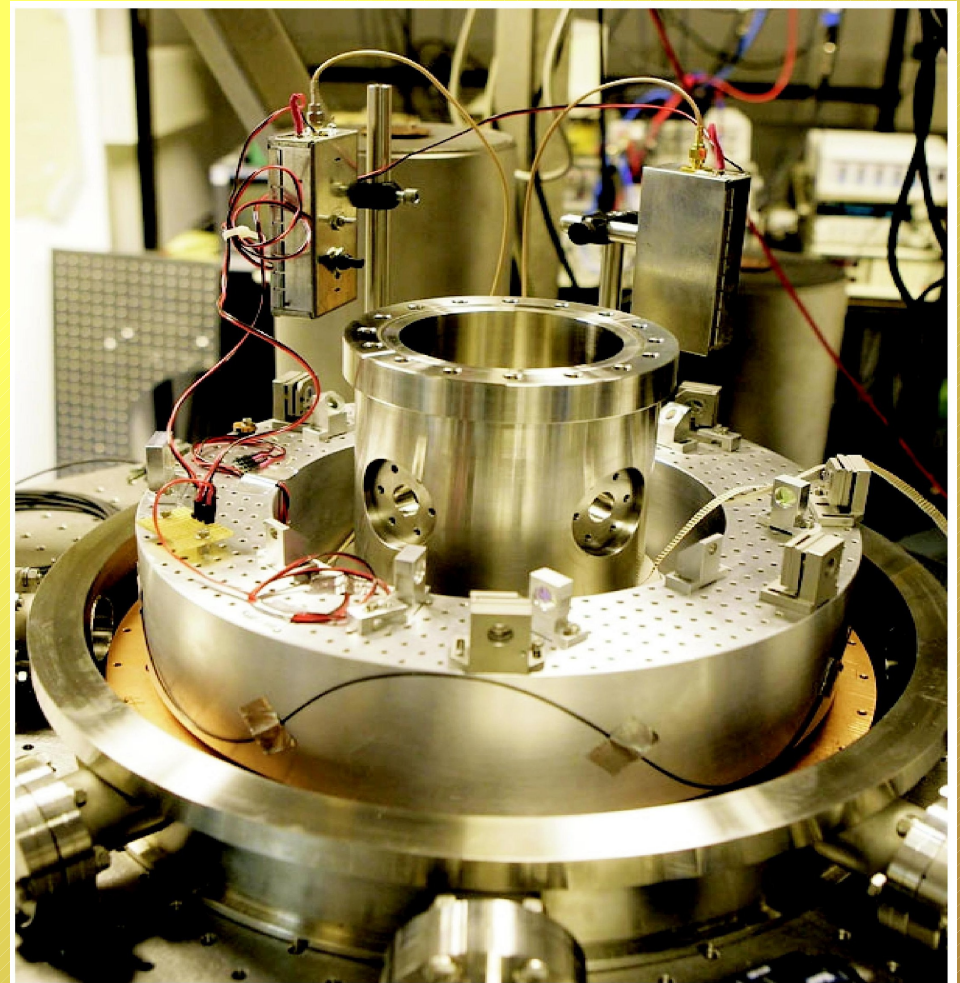
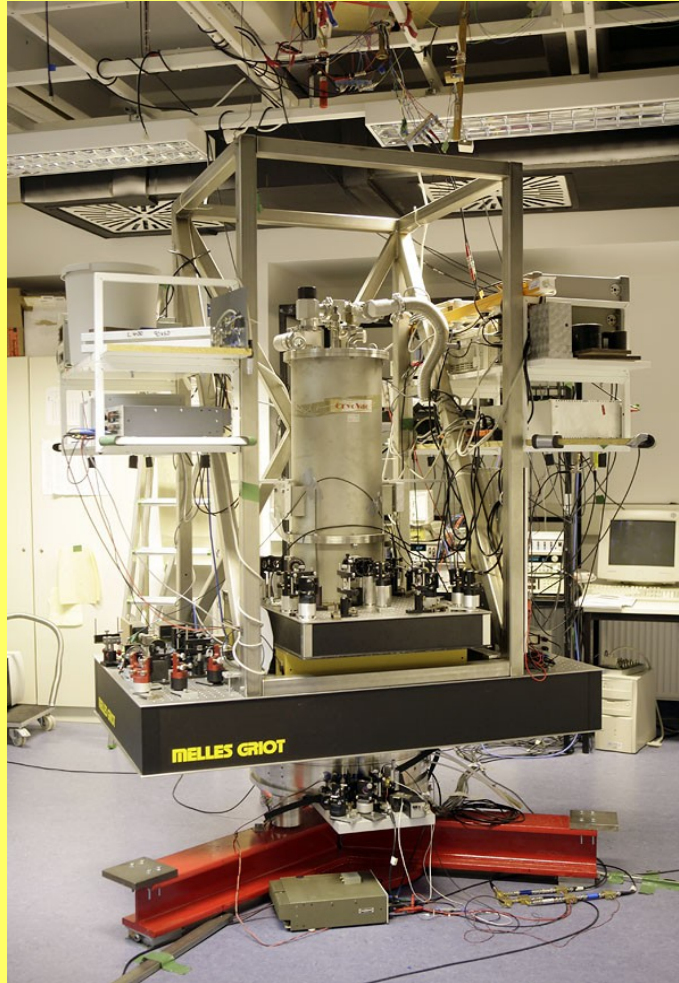


Fused Silica Resonatoren,
AG Metrologie und Quantenoptik, HU-Berlin

- Quarzglas ($0.48 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)
- stark reflektierende dielektrische Beschichtung (für 1064 nm)
 - Finesse von 380000
- thermisches Rauschen so gering, dass Betreiben bei Zimmertemperatur praktikabel
- beide Resonatoren auf gleicher Temperatur und Druck („common mode suppression“)

Das aktuelle Experiment

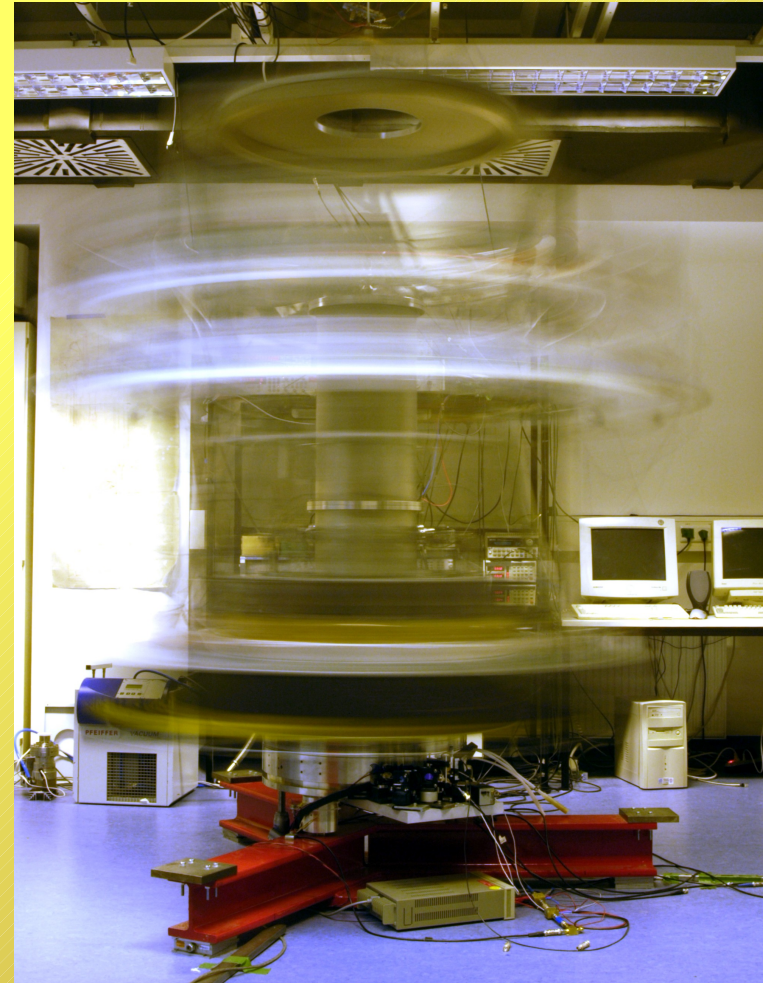
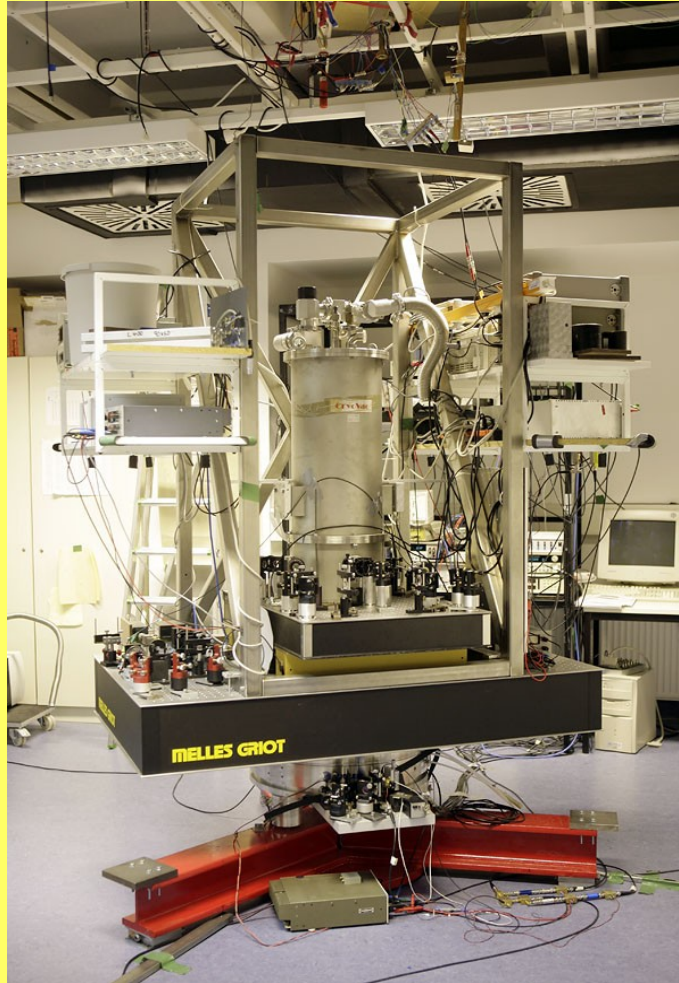
Aufbau



(fast) aktueller Messaufbau für Michelson-Morley-Experiment,
AG Metrologie und Quantenoptik, HU-Berlin

Das aktuelle Experiment

Aufbau

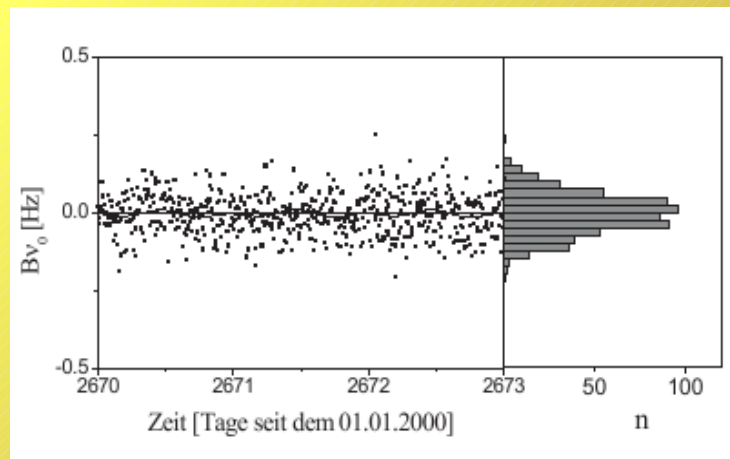
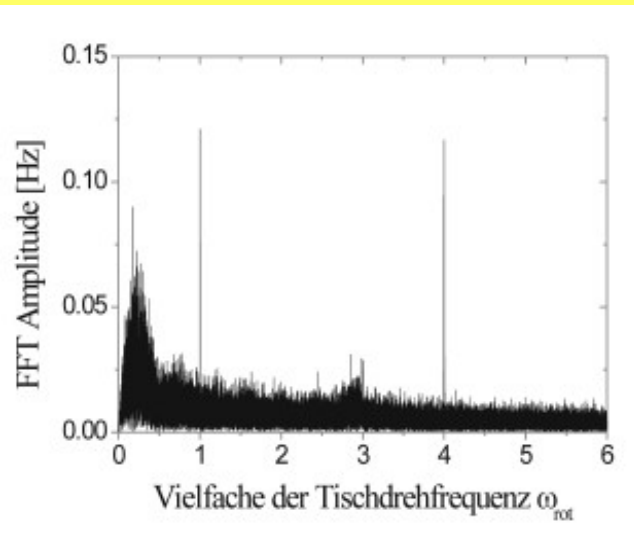
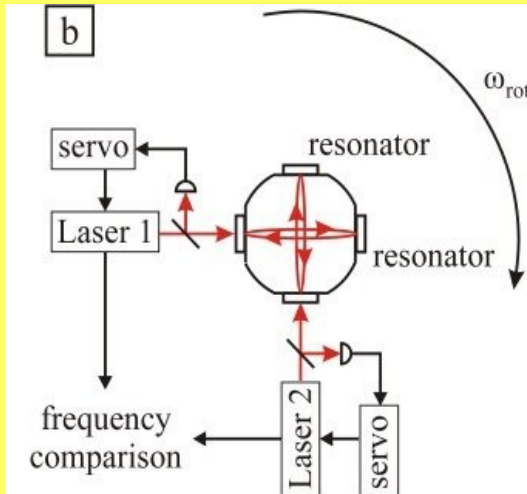


(fast) aktueller Messaufbau für Michelson-Morley-Experiment,
AG Metrologie und Quantenoptik, HU-Berlin

Resümee

Zusammenfassung

- Historische Experimente zugunsten der SRT
- Modernes MM-Experiment
 - Laser stabilisiert auf optische Resonatoren
 - Änderung der Lichtgeschwindigkeit zeigt sich in Änderung der Resonanzfrequenzen
 - Vergleich der Resonanzfrequenzen zweier senkrechter Resonatoren durch Messung der Schwebungsfrequenz



$$\frac{\delta c}{c} < 10^{-17}$$

Resümee

Ausblick

Ziel:

$$\frac{\delta C}{C} < 10^{-20} \dots 10^{-19}$$

Mögl. Verbesserungen:

- Tilt des Tisches verringern
- Drehgeschwindigkeit des Tisches
- Druckeffekte (UHV)
- Reduktion des thermischen Rauschens (z.B. cryogen)

Verbleibende Probleme:

- Gravitationsfelder
- ART wird wichtig
- Schrotrauschen der Laser

Resümee

Literatur

- Experimente

- [1], „First Results from an Improved Michelson-Morley Experiment“, S.Herrmann et al., noch unveröffentlicht
- [2], „Test of the Isotropy of the Speed of Light Using a Continuously Rotating Optical Resonator“, S.Herrmann et al., PRL, 03.10.05

- Übersichtsartikel

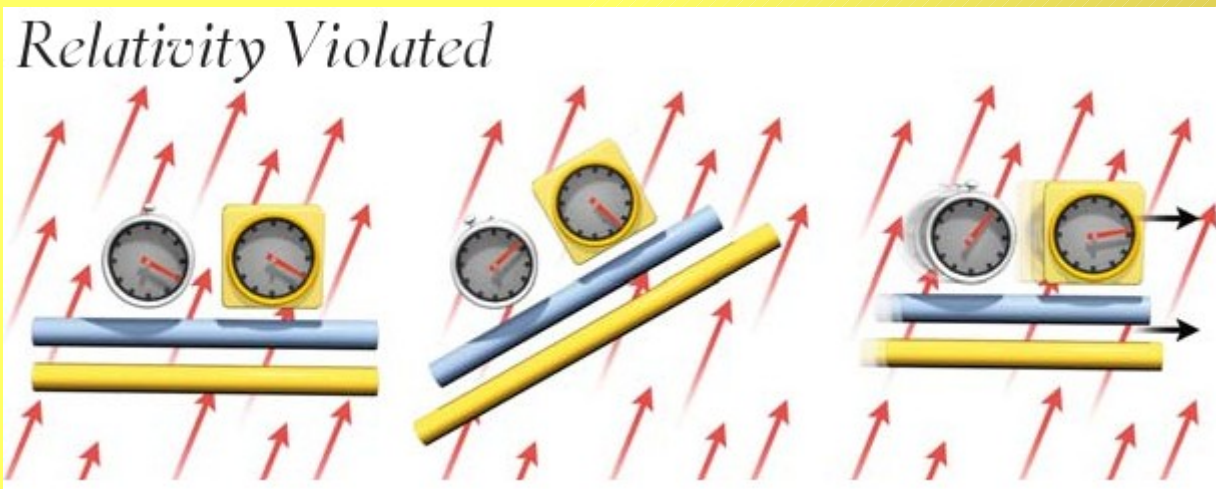
- [3], „Einsteins Theorie auf dem optischen Prüfstand“, H.Müller, A.Peters, Phys. Unserer Zeit, 2004, Nr.2
- [4], „The Search for Relativity Violations“, A.Kostelecky, Scientific American, Sept 2004
- [5], „Special Relativity Reconsidered“, A.Cho, Science, 11.02.05

- Diplomarbeit

- [6], „Ein modernes Michelson-Morley-Experiment mit rotierenden optischen Resonatoren“, Katharina Möhle, Mai 2007

Resümee

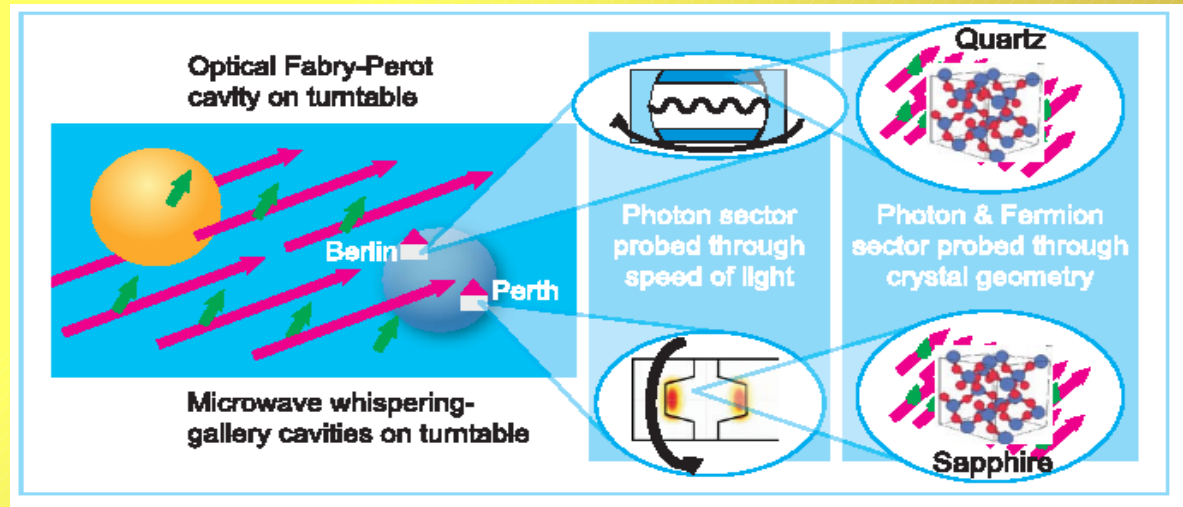
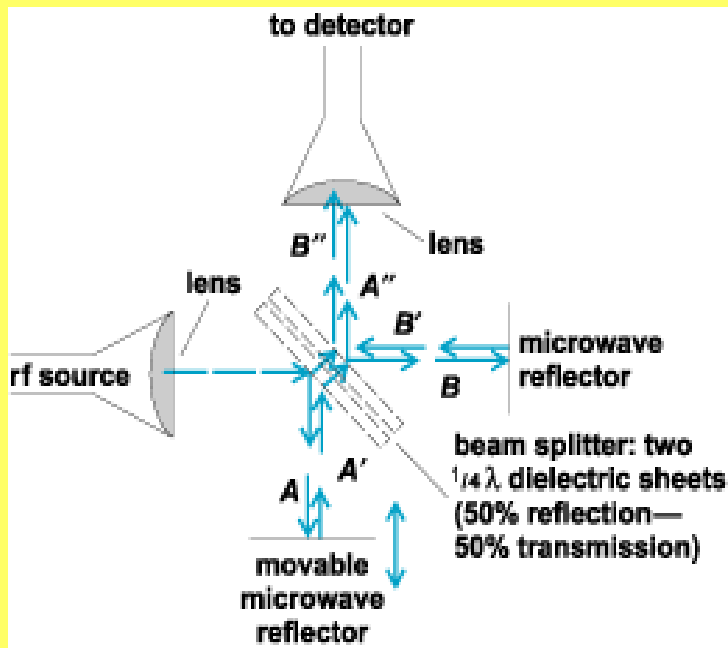
Beantwortung von Fragen



Einfluss eines lorentzverletzenden Vektorfeldes, aus [4].

Resümee

Beantwortung von Fragen

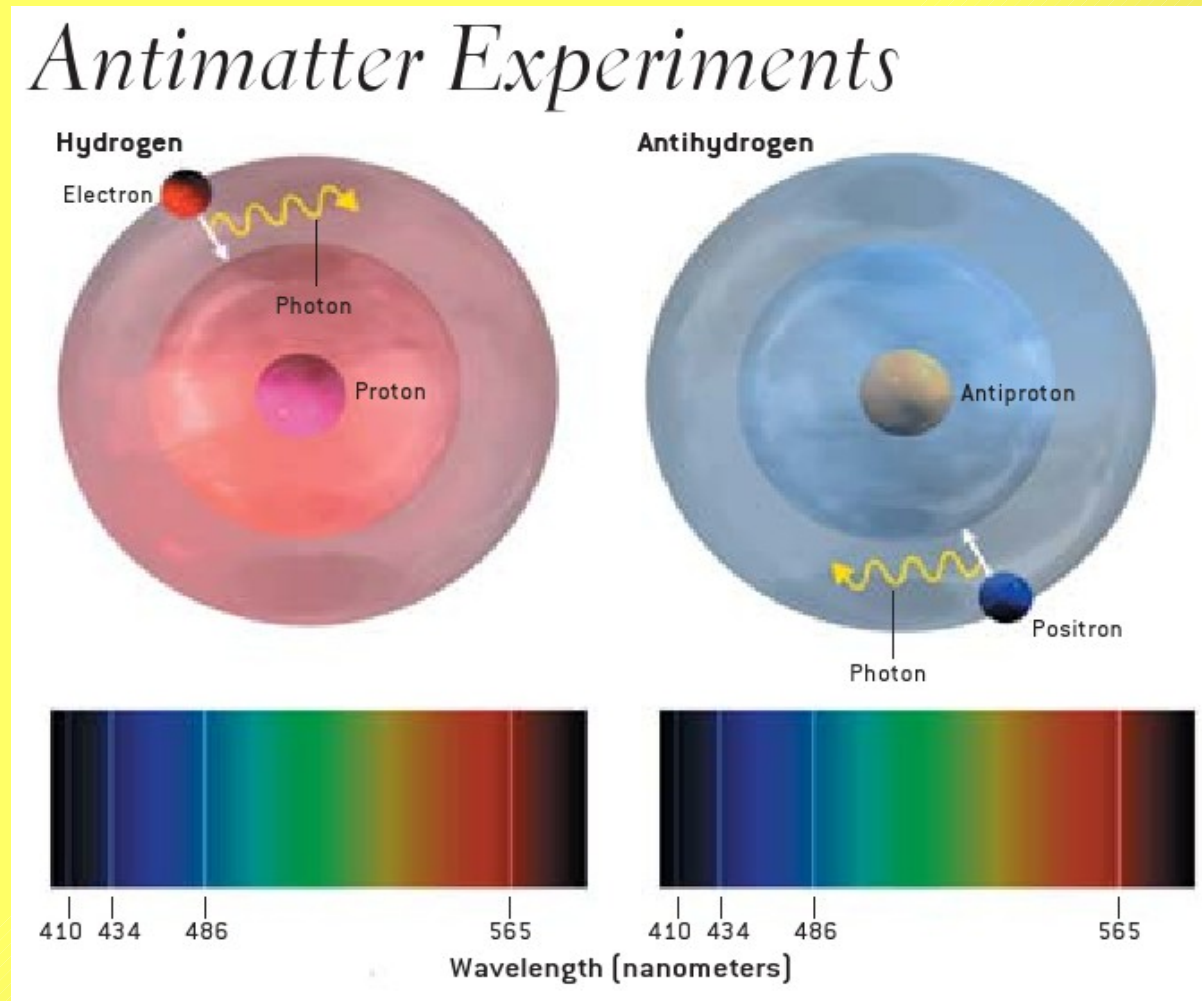


MM mit Mikrowellen,
von Answers.com

Alternative Aufbauten, aus PRL 99, 050401 (2007)

Resümee

Beantwortung von Fragen



CPT-Verletzung impliziert Lorentz-Verletzung, aus [4].