Seminar - Moderne Optik (2009)

Moderne optische Tests der Relativitätstheorie

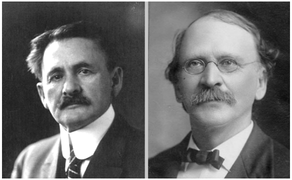
Alexander Stark

Institut für Physik
Humboldt-Universität zu Berlin

24.06.2009

Inhaltsverzeichnis

Historische Highlights

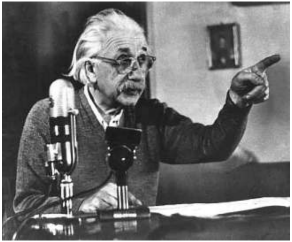


A. A. Michelson und E. W. Morley

Nachbau des Experiments von 1881

1881: klassisches Michelson-Morley Experiment

Historische Highlights


A. Einstein bei einer Rede

$$c = 299792458 \frac{m}{s}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

1881: klassisches Michelson-Morley Experiment

$\frac{1905}{1916}$: Relativitätstheorie von Einstein

Historische Highlights

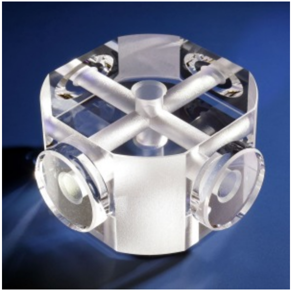
G. Rebka am Detektor

1881: klassisches Michelson-Morley Experiment

$\mathbf{\frac{1905}{1916}}$**:** Relativitätstheorie von Einstein

1960: R. Pound & G. Rebka: Rotverschiebung von Photonen durch Gravitation

Historische Highlights



optischer Resonator aus Fused Silica

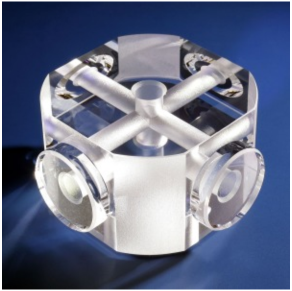
1881: klassisches Michelson-Morley Experiment

$\frac{1905}{1916}$: Relativitätstheorie von Einstein

1960: R. Pound & G. Rebka: Rotverschiebung von Photonen durch Gravitation

1979: J. L. Hall: moderne Michelson-Morley Experimente

Historische Highlights



optischer Resonator aus Fused Silica

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

1881: klassisches Michelson-Morley Experiment

$\frac{1905}{1916}$: Relativitätstheorie von Einstein

1960: R. Pound & G. Rebka: Rotverschiebung von Photonen durch Gravitation

1979: J. L. Hall: moderne Michelson-Morley Experimente

Gegenwart:

Hochpräzise Experimente mit optischen Resonatoren und Laser

Die spezielle Relativitätstheorie

Einsteins Relativitätsprinzip

- **1. Postulat:** Die Naturgesetze sind in allen Inertialsystemen gleich.

  $\rightarrow$ Homogenität und Isotropie der Raumzeit
  $\rightarrow$ Lorentzinvarianz

Die spezielle Relativitätstheorie

Einsteins Relativitätsprinzip

- **1. Postulat:** Die Naturgesetze sind in allen Inertialsystemen gleich.

  $\rightarrow$ Homogenität und Isotropie der Raumzeit
  $\rightarrow$ Lorentzinvarianz

- **2. Postulat:** Licht breitet sich in Vakuum in jeder Richtung geradlinig und mit Geschwindigkeit c aus, unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle oder des Beobachters.

Die spezielle Relativitätstheorie

Einsteins Relativitätsprinzip

- **1. Postulat:** Die Naturgesetze sind in allen Inertialsystemen gleich.
  - $\rightarrow$ Homogenität und Isotropie der Raumzeit
  - $\rightarrow$ Lorentzinvarianz
- **2. Postulat:** Licht breitet sich in Vakuum in jeder Richtung geradlinig und mit Geschwindigkeit c aus, unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle oder des Beobachters.

Effekte der SRT

$$
\begin{aligned}
L_v &= L_0\sqrt{1-v^2/c^2} \rightarrow \text{Längenkontraktion} \\
T_v &= T_0\sqrt{1-v^2/c^2} \rightarrow \text{Zeitdilatation}
\end{aligned}
$$

Standardmodell-Erweiterung (SME)

- Verletzung der Lorentzinvarianz
  $\rightarrow$ Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells der Elementarteilchen

Standardmodell-Erweiterung (SME)

- Verletzung der Lorentzinvarianz
  $\rightarrow$ Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells der Elementarteilchen
- Optische Präzessionsmessungen können niederenergetische Effekte von Theorien zur Quantengravitation offenbaren

Standardmodell-Erweiterung (SME)

- Verletzung der Lorentzinvarianz
  $\rightarrow$ Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells der Elementarteilchen
- Optische Präzessionsmessungen können niederenergetische Effekte von Theorien zur Quantengravitation offenbaren

Photonsektor der SME

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Kostelecký, V. Alan and Mewes, Matthew, *Phys. Rev. D*, **66**, 056005, (2002)

Standardmodell-Erweiterung (SME)

- Verletzung der Lorentzinvarianz
  $\rightarrow$ Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells der Elementarteilchen
- Optische Präzessionsmessungen können niederenergetische Effekte von Theorien zur Quantengravitation offenbaren

Photonsektor der SME

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

Kostelecký, V. Alan and Mewes, Matthew, *Phys. Rev. D*, **66**, 056005, (2002)

Standardmodell-Erweiterung (SME)

- Verletzung der Lorentzinvarianz
  $\rightarrow$ Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells der Elementarteilchen
- Optische Präzessionsmessungen können niederenergetische Effekte von Theorien zur Quantengravitation offenbaren

Photonsektor der SME

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}\underbrace{(k_{AF})^{\kappa}}_{\approx 0}\epsilon_{\kappa\lambda\mu\nu}A^{\lambda}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}F^{\kappa\lambda}F_{\mu\nu}$$

Kostelecký, V. Alan and Mewes, Matthew, *Phys. Rev. D*, **66**, 056005, (2002)

Standardmodell-Erweiterung (SME)

Photonsektor der SME

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}F^{\kappa\lambda}F_{\mu\nu}$$

Kostelecký, V. Alan and Mewes, Matthew, *Phys. Rev. D*, **66**, 056005, (2002)

Standardmodell-Erweiterung (SME)

Photonsektor der SME

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}F^{\kappa\lambda}F_{\mu\nu}$$

Kostelecký, V. Alan and Mewes, Matthew, *Phys. Rev. D*, **66**, 056005, (2002)

$\rightarrow$ $(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}$ enthält 19 freie Parameter

- 10 Parameter beschreiben polarisationsabhängige Effekte
  - ✓ Durch astronomische Messungen auf unter 10^{-32} bestimmt

Standardmodell-Erweiterung (SME)

Photonsektor der SME

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}F^{\kappa\lambda}F_{\mu\nu}$$

Kostelecký, V. Alan and Mewes, Matthew, *Phys. Rev. D*, **66**, 056005, (2002)

$\rightarrow$ $(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}$ enthält 19 freie Parameter

- 10 Parameter beschreiben polarisationsabhängige Effekte
  - ✓ Durch astronomische Messungen auf unter 10^{-32} bestimmt
- 9 restliche Parameter durch moderne Michelson-Morley Experimente messbar

Standardmodell-Erweiterung (SME)

Photonsektor der SME

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}F^{\kappa\lambda}F_{\mu\nu}$$

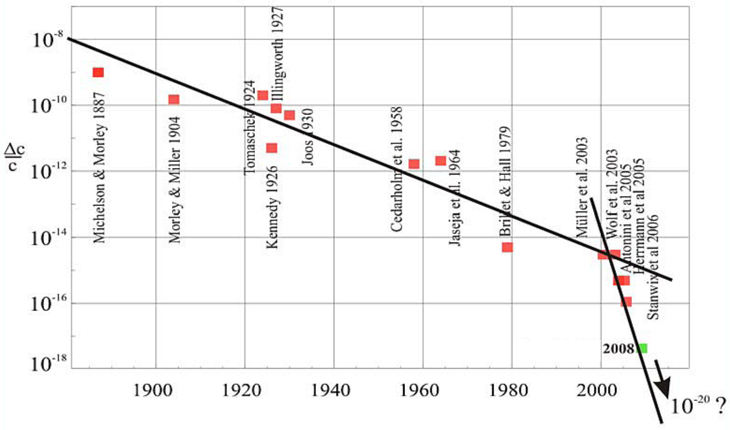
Kostelecký, V. Alan and Mewes, Matthew, *Phys. Rev. D*, **66**, 056005, (2002)

$\rightarrow$ $(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}$ enthält 19 freie Parameter

- 10 Parameter beschreiben polarisationsabhängige Effekte
  - ✓ Durch astronomische Messungen auf unter 10^{-32} bestimmt
- 9 restliche Parameter durch moderne Michelson-Morley Experimente messbar

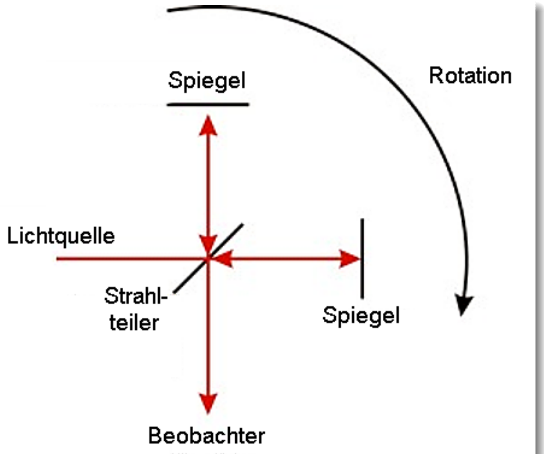
SME transformiert das Vakuum in ein quasi anisotropes Medium.

Entwicklung der Experimente



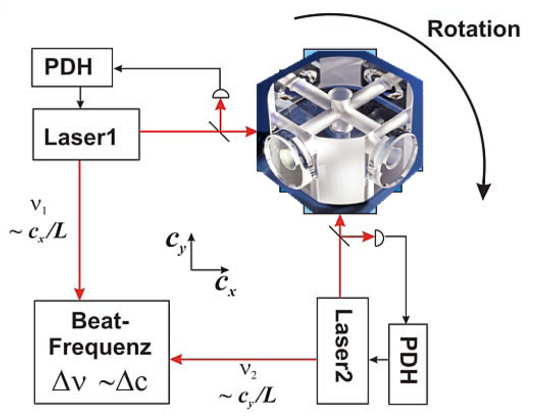
Obere Schranken für die Anisotropie der Lichtgeschwindigkeit
Moritz Nagel, *Diplomarbeit*, HU-Berlin, (2009)

Aufbau des Experiments



klassisches Michelson-Morley Experiment

Aufbau des Experiments

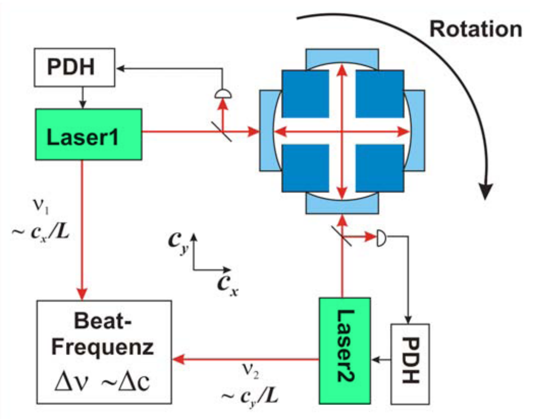


modernes Michelson-Morley Experiment

optischer Resonator:

- Spiegelabstand $L = 5.5$cm
- Finesse $\mathcal{F} = 410000$ (R=99.9992%)
- Linienbreite: $FWHM = 6.5$kHz
- Fused Silica
- Temperaturstabilität: $\alpha = 6 \times 10^{-7}/K$ $(\Delta\nu/\nu_0 = -\alpha T)$

Aufbau des Experiments

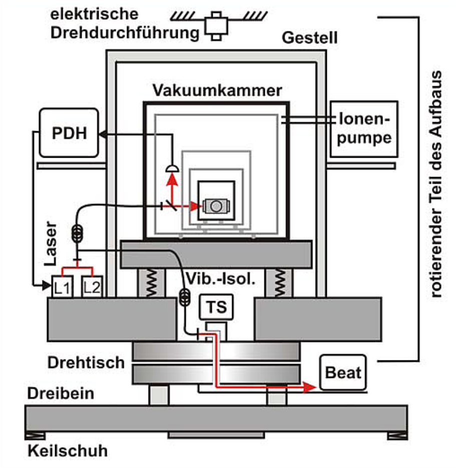


modernes Michelson-Morley Experiment

Laser:

- Nd:YAG ($\lambda = 1064$nm)
- Ausgangsleistung:
  - Laser1: 200mW
  - Laser2: 500mW
- Regelung:
  - *schnell*: Piezo (MHz/V)
  - *langsam*: Temperatur (GHz/K)

Aufbau des Experiments



modernes Michelson-Morley Experiment,
(A. Peters, HU-Berlin)

Randbedingungen:

- thermische Isolierung (aber keine Kühlung!) durch Thermoschilde
- Vakuum 10^{-6}mbar (bis 10^{-10}mbar möglich)
- aktive Vibrationsdämpfung
- Präzisionsdrehtisch (aktive Kontrolle der Verkippung der Rotationsachse $< 1\mu$rad)

Frequenzstabilisierung

- Frequenzstablisierung eines Lasers auf einen optischen Resonator
  - $\rightarrow$ Laserfrequenz ν_L wird aktiv durch Rückkopplung auf einer Resonatorfrequenz ν_R gehalten

Frequenzstabilisierung

- Frequenzstablisierung eines Lasers auf einen optischen Resonator
  - $\rightarrow$ Laserfrequenz ν_L wird aktiv durch Rückkopplung auf einer Resonatorfrequenz ν_R gehalten
  - $\rightarrow$ Fehlersignal $\nu_L - \nu_R$ nach dem Pound-Drever-Hall-Verfahren (PDH)
  - $\rightarrow$ Resonanzfrequenzen eines Resonators $\nu_R^n = nc/2L$

Frequenzstabilisierung

- Frequenzstablisierung eines Lasers auf einen optischen Resonator
  - $\rightarrow$ Laserfrequenz ν_L wird aktiv durch Rückkopplung auf einer Resonatorfrequenz ν_R gehalten
  - $\rightarrow$ Fehlersignal $\nu_L - \nu_R$ nach dem Pound-Drever-Hall-Verfahren (PDH)
  - $\rightarrow$ Resonanzfrequenzen eines Resonators $\nu_R^n = nc/2L$

Bei konstanter Resonatorlänge L gibt die stabilisierte Laserfrequenz ν_L die mögliche Änderung der Lichtgeschwindigkeit wieder

$$\Delta\nu_R = \Delta c/2L$$

Messung der Anisotropie

- Beat-Frequenz $\nu_B = |\nu_{L1} - \nu_{L2}|$

  $\rightarrow$ $\nu_L = 2.82 \times 10^{14}$Hz direkte Messung unpraktikabel

Messung der Anisotropie

- Beat-Frequenz $\nu_B = |\nu_{L1} - \nu_{L2}|$

  $\rightarrow$ $\nu_L = 2.82 \times 10^{14}$Hz direkte Messung unpraktikabel
  $\rightarrow$ Überlagerung der Laserfrequenzen $\rightsquigarrow$ Schwebungssignal (Beat)

Messung der Anisotropie

- Beat-Frequenz $\nu_B = |\nu_{L1} - \nu_{L2}|$

  $\rightarrow$ $\nu_L = 2.82 \times 10^{14}$Hz direkte Messung unpraktikabel
  $\rightarrow$ Überlagerung der Laserfrequenzen $\rightsquigarrow$ Schwebungssignal (Beat)
  $\rightarrow$ Messung des Beatsignals mit einer schnellen Photodiode

Messung der Anisotropie

- Beat-Frequenz $\nu_B = |\nu_{L1} - \nu_{L2}|$
  - $\rightarrow$ $\nu_L = 2.82 \times 10^{14}$Hz direkte Messung unpraktikabel
  - $\rightarrow$ Überlagerung der Laserfrequenzen $\rightsquigarrow$ Schwebungssignal (Beat)
  - $\rightarrow$ Messung des Beatsignals mit einer schnellen Photodiode

Sensitiv auf relative Schwankungen $\boldsymbol{\Delta\nu/\nu = 3.5 \times 10^{-17}}$

Analyse der Messwerte

Ziel:

Bestimmung der freien Parameter des $(\mathbf{k_F})_{\kappa\lambda\mu\nu}$ Tensors

Analyse der Messwerte

Ziel:

Bestimmung der freien Parameter des $(\mathbf{k_F})_{\kappa\lambda\mu\nu}$ Tensors
$\longrightarrow$ Umformulierung durch modifizierte Maxwell-Gleichungen auf Amplituden des Beatsignals

Analyse der Messwerte

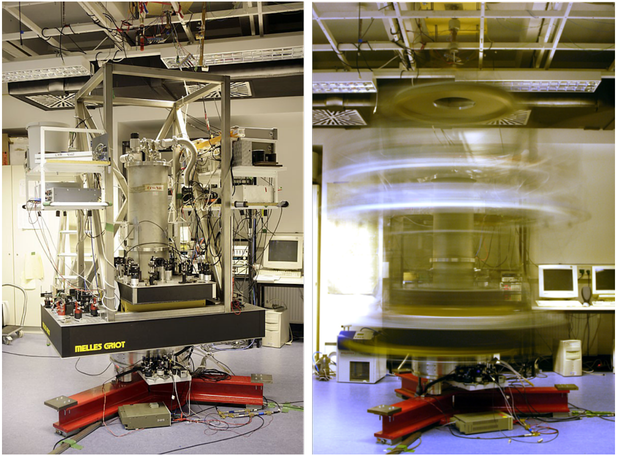
Ziel:

Bestimmung der freien Parameter des $\mathbf{(k_F)_{\kappa\lambda\mu\nu}}$ Tensors
$\longrightarrow$ Umformulierung durch modifizierte Maxwell-Gleichungen auf Amplituden des Beatsignals

- Drehung des Experiments mit Frequenz ω
  $\rightsquigarrow$ Modulation des Beatsignals

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 2B \sin(2\omega t) + 2C \cos(2\omega t)$$

Analyse der Messwerte



links: Moderenes Michelson-Morley Experiment bei der AG Optische Metrologie (Prof. A. Peters), HU-Berlin
rechts: Langzeitbelichtung der Drehung des Experiments

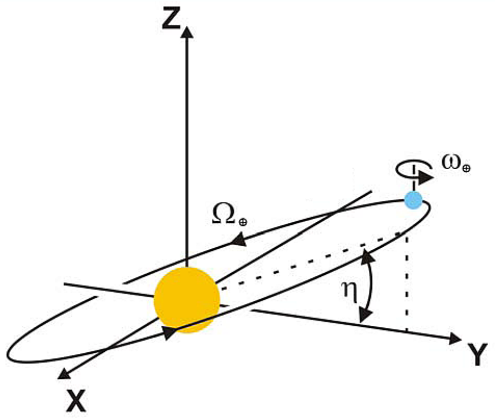
Analyse der Messwerte

Ziel:

Bestimmung der freien Parameter des $(\mathbf{k_F})_{\kappa\lambda\mu\nu}$ Tensors
$\longrightarrow$ Umformulierung durch modifizierte Maxwell-Gleichungen auf Amplituden des Beatsignals

- weitere Modulation des Beats durch Erdrotation und Drehung der Erde um die Sonne
  $\rightsquigarrow$ Amplituden zeitabhängig: $B = B(t)$, $C = C(t)$

Analyse der Messwerte



Sonnenzentriertes Inertialsystem mit Erdrotation $\omega_\oplus$ und siderischem Umlauf $\Omega_\oplus$
Moritz Nagel, *Diplomarbeit*, HU-Berlin, (2009)

Analyse der Messwerte

- weitere Modulation des Beats durch Erdrotation und Drehung der Erde um die Sonne
  $\rightsquigarrow$ Amplituden zeitabhängig: $B = B(t)$, $C = C(t)$

Analyse der Messwerte

- weitere Modulation des Beats durch Erdrotation und Drehung der Erde um die Sonne
  $\rightsquigarrow$ Amplituden zeitabhängig: $B = B(t)$, $C = C(t)$

$$\begin{aligned} B(t) = B_0 + B_{s1}\sin(\omega_\oplus(t-t_0)) + B_{c1}\cos(\omega_\oplus(t-t_0)) \\ + B_{s2}\sin(2\omega_\oplus(t-t_0)) + B_{c2}\cos(2\omega_\oplus(t-t_0)) \end{aligned}$$

Analyse der Messwerte

- weitere Modulation des Beats durch Erdrotation und Drehung der Erde um die Sonne
  $\rightsquigarrow$ Amplituden zeitabhängig: $B = B(t)$, $C = C(t)$

$$\begin{aligned} B(t) = B_0 &+ B_{s1}\sin(\omega_\oplus(t-t_0)) + B_{c1}\cos(\omega_\oplus(t-t_0)) \\ &+ B_{s2}\sin(2\omega_\oplus(t-t_0)) + B_{c2}\cos(2\omega_\oplus(t-t_0)) \end{aligned}$$

$$B(t)_{s1} = Y_{0s1} + Y_{ss1}\sin(\Omega_\oplus(t-t_0')) + Y_{cs1}\cos(\Omega_\oplus(t-t_0'))$$

Analyse der Messwerte

- weitere Modulation des Beats durch Erdrotation und Drehung der Erde um die Sonne
  $\rightsquigarrow$ Amplituden zeitabhängig: $B = B(t)$, $C = C(t)$

$$B(t) = B_0 + B_{s1}\sin(\omega_\oplus(t-t_0)) + B_{c1}\cos(\omega_\oplus(t-t_0)) \\ +B_{s2}\sin(2\omega_\oplus(t-t_0)) + B_{c2}\cos(2\omega_\oplus(t-t_0))$$

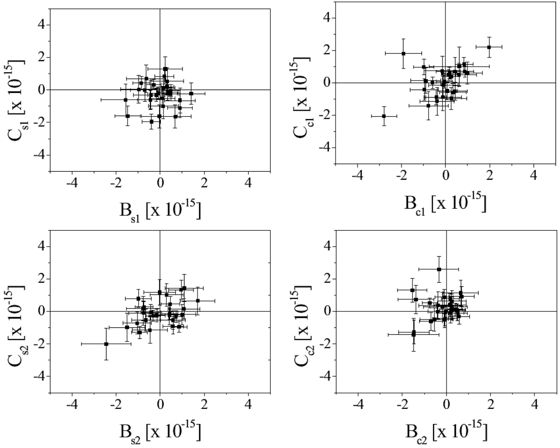
$$B(t)_{s1} = Y_{0s1} + Y_{ss1}\sin(\Omega_\oplus(t-t_0')) + Y_{cs1}\cos(\Omega_\oplus(t-t_0'))$$

$$Y_{0s1} = 0, \quad Y_{0s1} = \frac{\sin\chi}{2}\kappa_{e-}^{XY} \text{ usw.}$$

Ergebnis:

Bestimmungsgleichungen für die freien Parameter
$\longrightarrow$ Fitprozedur über entsprechende Zeiträume

Ergebnisse



Ergebnisse zu einigen Fitparametern
Sven Herrmann, *PhD-Thesis*, HU-Berlin, (2008)

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- *optische Experimente höchster Präzesion können Hinweise auf eine Physik jenseits des Standardmodells offenbaren*
- *mögliche Anisotropie der Lichtgeschwindigkeit verursacht durch ein quasi anisotropes Vakuum*

$\Rightarrow$ optische Metrologie bietet eine Möglichkeit diese zu untersuchen

Zusammenfassung

- *optische Experimente höchster Präzesion können Hinweise auf eine Physik jenseits des Standardmodells offenbaren*
- *mögliche Anisotropie der Lichtgeschwindigkeit verursacht durch ein quasi anisotropes Vakuum*

$\Rightarrow$ optische Metrologie bietet eine Möglichkeit diese zu untersuchen

- *moderne Version des Michelson-Morley Experiments durchgeführt an der HU Berlin*
- *hochwertige optische Resonatoren und Laser hoher Frequenzstabilität*

$\Rightarrow$ erreichte Genauigkeit von $\frac{\Delta c}{c} < 10^{-17}$

Zusammenfassung

- *optische Experimente höchster Präzesion können Hinweise auf eine Physik jenseits des Standardmodells offenbaren*
- *mögliche Anisotropie der Lichtgeschwindigkeit verursacht durch ein quasi anisotropes Vakuum*

$\Rightarrow$ optische Metrologie bietet eine Möglichkeit diese zu untersuchen

- *moderne Version des Michelson-Morley Experiments durchgeführt an der HU Berlin*
- *hochwertige optische Resonatoren und Laser hoher Frequenzstabilität*

$\Rightarrow$ erreichte Genauigkeit von $\frac{\Delta c}{c} < 10^{-17}$

Bisherige Messungen ergeben ein Nullresultat.

Literaturangaben

- **Müller, H. und Peters, A., Phys. Unserer Zeit, 2004, 35(2), 70**
- **Brillet, A. und Hall, J. L., Phys. Rev. Lett., 42, 549, (1979)**
- **Kostelecký, V. Alan and Mewes, Matthew, Phys. Rev. D, 66, 056005, (2002)**
- **Kostelecký, V. Alan, Personal Webpage,**
  `http://www.physics.indiana.edu/~kostelec/`
- **Nagel, M. , Diplomarbeit, HU-Berlin, (2009)**
- **Herrmann, S., PhD-Thesis, HU-Berlin, (2008)**
- **Müller, H. et al., Phys. Rev. Lett., 99, 050401, (2007)**
- **Günther, H., Spezielle Relativitätstheorie, Teubner Verlag, Wiesbaden, (2007)**
- **Bouveret, S., Progressbar LaTeX Beamer theme, v. 0.32,**
  `http://www.cert.fr/dcsd/THESES/sbouveret/francais/LaTeX.html`

Ich bedanke mich für Eure Aufmerksamkeit.

Lagrange-Formalismus

Lagrange-Funktion:

$$\delta S = 0 \;\rightarrow\; S = \int dt\, L \;\rightarrow\; L = \int d^3 r\, \mathcal{L}$$

$$\text{z.B. } \mathcal{L} = -\tfrac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \text{ mit } F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$
$$\text{und } A_\mu = (\phi, \vec{A}) \;\rightarrow\; \text{rot}\vec{A} = \vec{B}$$

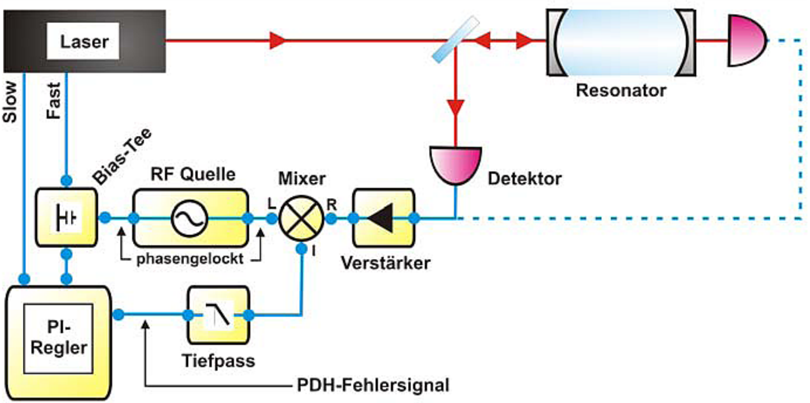
Euler-Lagrange-Gleichung:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_\nu} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu A_\nu)} = 0$$

Maxwell-Gleichungen im Vakuum:

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = 0 \;\Leftrightarrow\; \text{rot}\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \;\text{ usw.}$$

Das Pound-Drever-Hall-Verfahren (PDH)



Schema der PDH-Frequenzstabilisierung