Neutronen Interferometrie

COW-Experimente

Matthias Reggentin

Humboldt-Universität zu Berlin,
Institut für Physik

21. Januar 2009

1. Materiewellen
2. Neutronen
3. Neutronen Interferometrie
4. COW-Experiment(e)

Materiewellen

- 1923, Louis-Victor de Broglie in *Waves and Quanta*: Verallgemeinerung des Teilchen-Welle-Dualismus von Photonen auf klassische Teilchen; Nature **112**, 540 (1923)

- Teilchen mit Impuls p de Broglie Wellenlänge zugeordnet

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m \cdot E_{kin}}}$$

Materiewellen

- 1923, Louis-Victor de Broglie in *Waves and Quanta*: Verallgemeinerung des Teilchen-Welle-Dualismus von Photonen auf klassische Teilchen; Nature **112**, 540 (1923)

- Teilchen mit Impuls p de Broglie Wellenlänge zugeordnet

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m \cdot E_{kin}}}$$

Materiewellen

- 1927 von Clinton Davisson und Lester Germer durch Beugung von Elektronen an Nickel experimentell bestätigt; Nature **119**, 558 - 560 (1927)

- Beobachtung gleicher Bragg-Reflexionsmuster bei Elektronen - und Röntgenstrahlung gleicher Wellenlänge

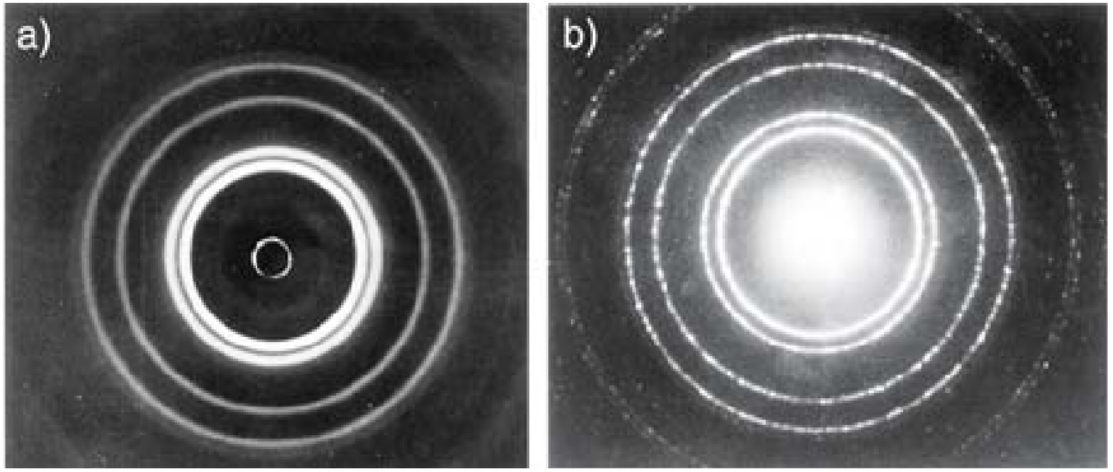


Abbildung: (a) Elektronen- (b)Röntgenbeugung, Experimental Physik 3, *Springer*, W. Demtröder

Materiewellen

- 1927 von Clinton Davisson und Lester Germer durch Beugung von Elektronen an Nickel experimentell bestätigt; Nature **119**, 558 - 560 (1927)

- Beobachtung gleicher Bragg-Reflexionsmuster bei Elektronen - und Röntgenstrahlung gleicher Wellenlänge

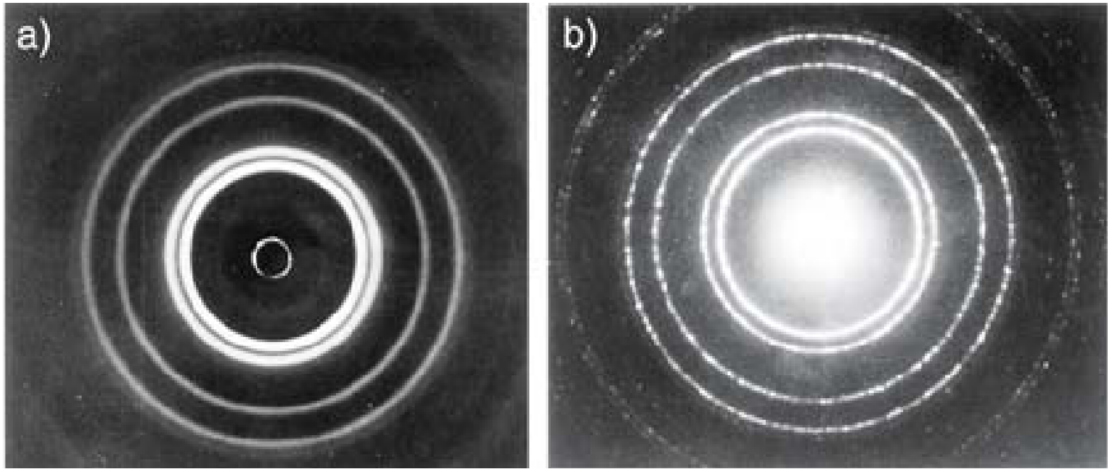


Abbildung: (a) Elektronen- (b)Röntgenbeugung, Experimental Physik 3, *Springer*, W. Demtröder

Neutronen

- Ruhemasse $m_0 = 939.6$ MeV
- Fermion - Spin $1/2$
- magnetisches Moment $\mu \simeq -9.662 \times 10^{-27}$ J/T
- Wellenlänge:
  thermische Neutronen: $\lambda \simeq 1.8$ Å
  Kalte Neutronen (VCN): $\lambda \simeq 10^2$Å

  Neutron Interferometry, *Oxford University Press*, H. Rauch, S. Werner

- also elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung sowie Gravitation

Neutronen

- Ruhemasse $m_0 = 939.6$ MeV
- Fermion - Spin $1/2$
- magnetisches Moment $\mu \simeq -9.662 \times 10^{-27}$ J/T
- Wellenlänge:
  thermische Neutronen: $\lambda \simeq 1.8$ Å
  Kalte Neutronen (VCN): $\lambda \simeq 10^2$Å

  Neutron Interferometry, *Oxford University Press*, H. Rauch, S. Werner

- also elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung sowie Gravitation

Neutronen Interferometrie

- Messung von interferierenden Neutronenstrahlen
- Phasenverschiebung auf Grund der möglichen WW
- Probleme gegenüber Interferometrie mit Photonen:

  geringe Geschwindigkeit thermischer Neutronen ($v \simeq 2200$m/s), Interferrometerlängen in der Größenordnung $\simeq 1$dm $\Rightarrow$ Passierdauer im Vergleich zu Photonen um Faktor $\times 10^4$ erhöht

Neutronen Interferometrie

- Messung von interferierenden Neutronenstrahlen
- Phasenverschiebung auf Grund der möglichen WW

- Probleme gegenüber Interferometrie mit Photonen:

  geringe Geschwindigkeit thermischer Neutronen ($v \simeq 2200\mathrm{m/s}$), Interferrometerlängen in der Größenordnung $\simeq 1\mathrm{dm}$ $\Rightarrow$ Passierdauer im Vergleich zu Photonen um Faktor $\times 10^4$ erhöht

Neutronen Interferometrie

- Messung von interferierenden Neutronenstrahlen
- Phasenverschiebung auf Grund der möglichen WW

- Probleme gegenüber Interferometrie mit Photonen:

  geringe Geschwindigkeit thermischer Neutronen ($v \simeq 2200\mathrm{m/s}$), Interferrometerlängen in der Größenordnung $\simeq 1\mathrm{dm}$ $\Rightarrow$ Passierdauer im Vergleich zu Photonen um Faktor $\times 10^4$ erhöht

Neutronen Interferometrie

- Messung von interferierenden Neutronenstrahlen
- Phasenverschiebung auf Grund der möglichen WW

- Probleme gegenüber Interferometrie mit Photonen:

  geringe Geschwindigkeit thermischer Neutronen ($v \simeq 2200$m/s), Interferrometerlängen in der Größenordnung $\simeq 1$dm $\Rightarrow$ Passierdauer im Vergleich zu Photonen um Faktor $\times 10^4$ erhöht

Allgemeiner Aufbau

- Anforderung an Abschirmung gegenüber der Umgebung

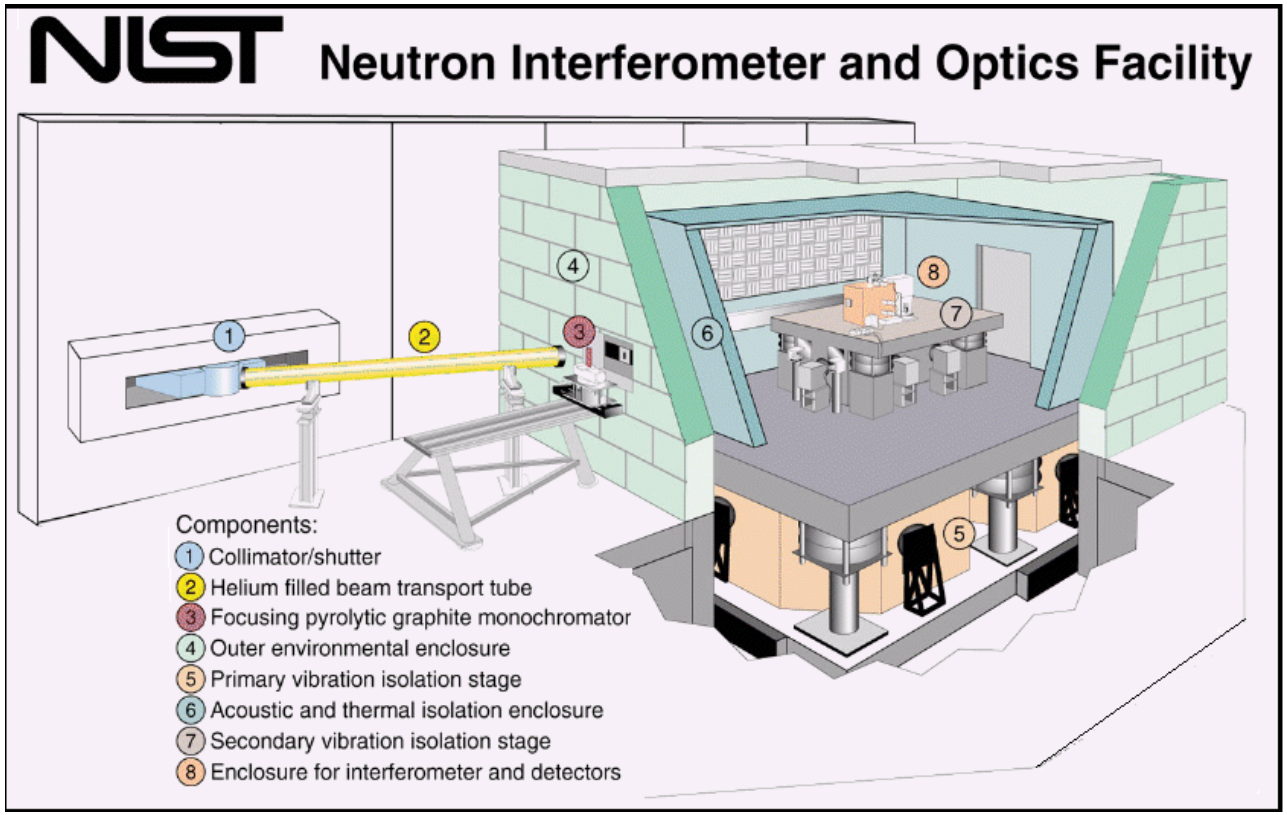


Abbildung: NIST Aufbau, Gaithersburg Maryland
`http://www.ncnr.nist.gov/instruments/`

Allgemeiner Aufbau

- Neutronenquelle Versuchsreaktoren

Abbildung: TIGRA Versuchsreaktor TU Wien
http://www.ati.ac.at/

Allgemeiner Aufbau

- Monochromator, Interferometer und Detektoren

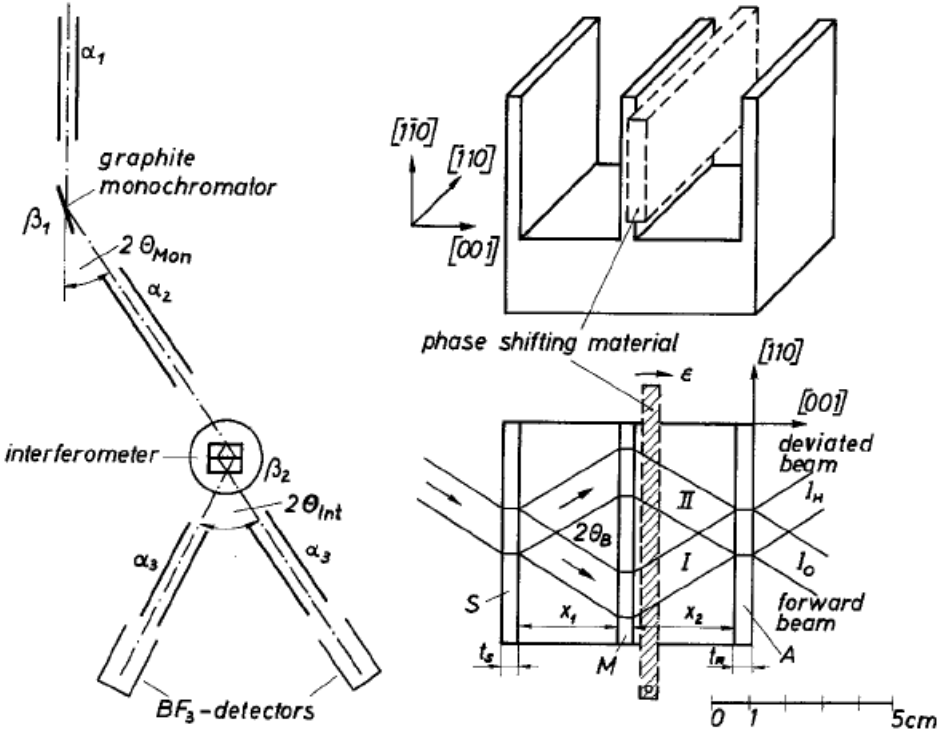
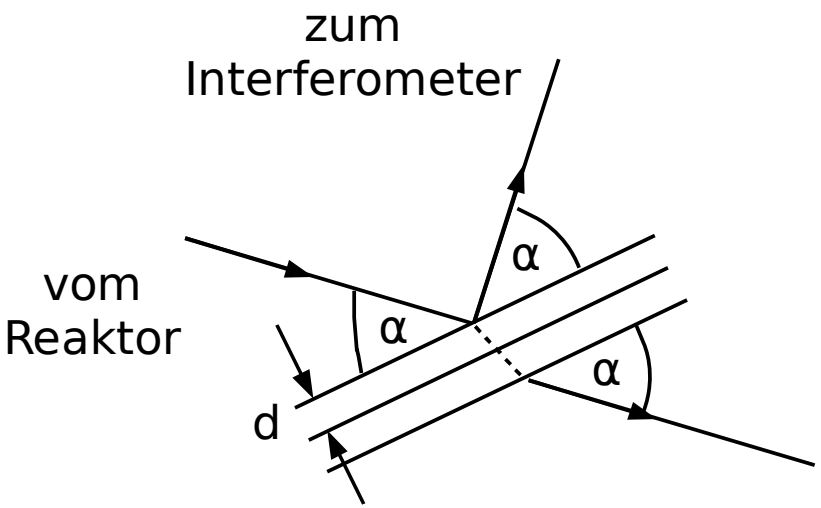


Abbildung: W. Bauspiess, U. Bonse, Z. Physik **271**, 178

Allgemeiner Aufbau

- Monochromator: Kristall, Auswahl über Bragg-Bedingung

$$2d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda \quad , n = 1, 2, 3, ...$$



Interferometer - Einkristallinterferometer

- 1974 durch H. Rauch, W.Treimer und U. Bonse Silizium-Einkristallinterferometer getestet
- "The revolution was ... braught about by the wonderfully simple, didactically exquisite, and beautiful stable perfect silicon crystal interferometer... .", Neutron Interferometry, *Oxford University Press*
- Vorteil: deutlich separierte Röntgen- bzw. Neutronenstrahlen

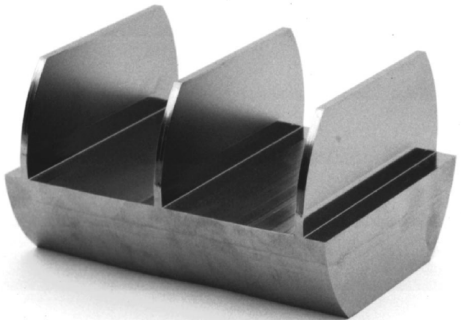


Abbildung: K. Littrell *et al.* Phys. Rev. **A 56**, 1767(1997)

Interferometer - Einkristallinterferometer

- 1974 durch H. Rauch, W.Treimer und U. Bonse Silizium-Einkristallinterferometer getestet
- "The revolution was ... braught about by the wonderfully simple, didactically exquisite, and beautiful stable perfect silicon crystal interferometer... .", Neutron Interferometry, *Oxford University Press*

- Vorteil: deutlich separierte Röntgen- bzw. Neutronenstrahlen

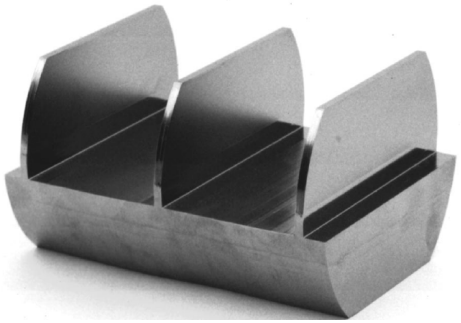


Abbildung: K. Littrell *et al.* Phys. Rev. **A 56**, 1767(1997)

Interferometer - Einkristallinterferometer

- 1974 durch H. Rauch, W.Treimer und U. Bonse Silizium-Einkristallinterferometer getestet
- "The revolution was ... braught about by the wonderfully simple, didactically exquisite, and beautiful stable perfect silicon crystal interferometer... .", Neutron Interferometry, *Oxford University Press*

- Vorteil: deutlich separierte Röntgen- bzw. Neutronenstrahlen

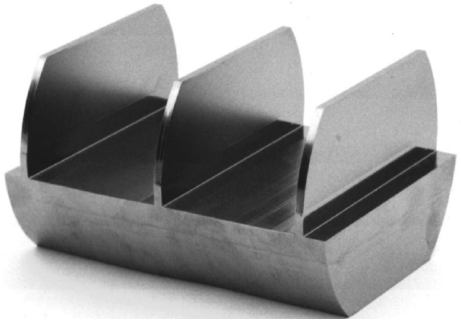


Abbildung: K. Littrell *et al.* Phys. Rev. **A 56**, 1767(1997)

Einkristallinterferometer

- Typ: Mach-Zehnder Interferometer
- Strahlaufspaltung durch Beugung an Bragggittern
- Positionierung der Gitter mit der Genauigkeit des Gitterparameters g, da Einkristall

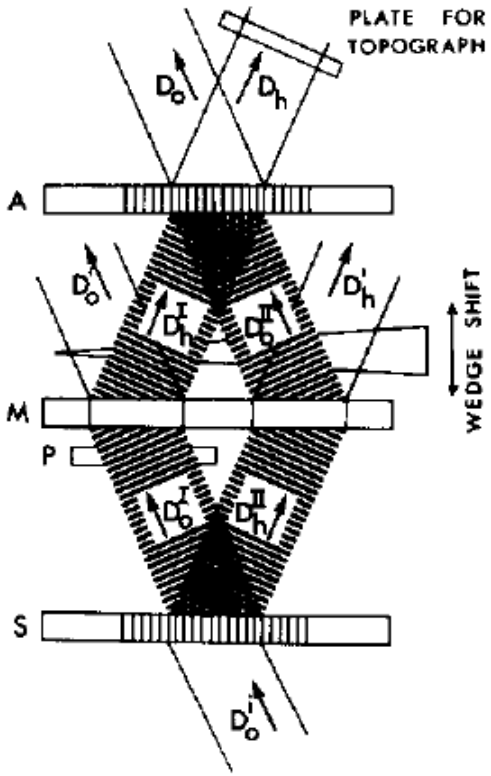


Abbildung: U. Bonse M. Hart, Appl. Phys. Lett. **6**, 155 (1965)

Einkristallinterferometer

- Typ: Mach-Zehnder Interferometer
- Strahlaufspaltung durch Beugung an Bragggittern
- Positionierung der Gitter mit der Genauigkeit des Gitterparameters g, da Einkristall

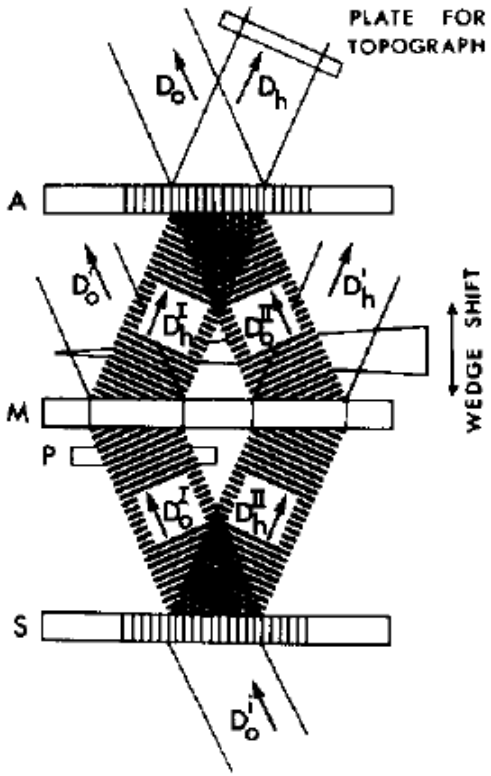


Abbildung: U. Bonse M. Hart, Appl. Phys. Lett. **6**, 155 (1965)

Einkristallinterferometer

- Ansatz für Wellenfunktion am Detektor $\psi_D = \psi_I + \psi_{II}$
- für 0-Beam $\psi_j \propto \psi_0 \exp\{i\chi_j\}$, $j = I, II$, χ_j: jeweilge Phase, Proportionalitätskonstante von Reflexion und Transmission abhängig, da gleichviele Reflexionen wie Transmissionen an den Gittern $\rightarrow$ gleiche Phase und Amplitude
- bei Veränderung der optischen Weglänge Phasenunterschied $\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$ und Intensität am Detektor von

$$I_0 \quad = |\psi_I + \psi_{II}|^2 = \alpha(1 + \cos(\Delta\chi))$$

Einkristallinterferometer

- Ansatz für Wellenfunktion am Detektor $\psi_D = \psi_I + \psi_{II}$
- für 0-Beam $\psi_j \propto \psi_0 \exp\{i\chi_j\}$, $j = I, II$, χ_j: jeweilge Phase, Proportionalitätskonstante von Reflexion und Transmission abhängig, da gleichviele Reflexionen wie Transmissionen an den Gittern $\rightarrow$ gleiche Phase und Amplitude
- bei Veränderung der optischen Weglänge Phasenunterschied $\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$ und Intensität am Detektor von

$$I_0 \quad = |\psi_I + \psi_{II}|^2 = \alpha(1 + \cos(\Delta\chi))$$

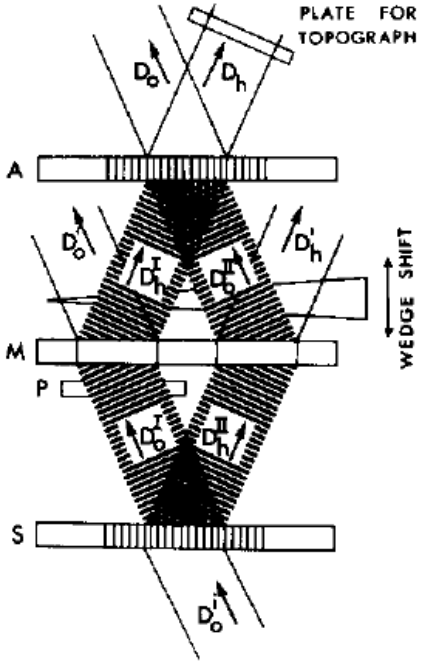
Einkristallinterferometer

- Ansatz für Wellenfunktion am Detektor $\psi_D = \psi_I + \psi_{II}$
- für 0-Beam $\psi_j \propto \psi_0 \exp\{i\chi_j\}$, $j = I, II$, χ_j: jeweilge Phase, Proportionalitätskonstante von Reflexion und Transmission abhängig, da gleichviele Reflexionen wie Transmissionen an den Gittern $\rightarrow$ gleiche Phase und Amplitude
- bei Veränderung der optischen Weglänge Phasenunterschied $\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$ und Intensität am Detektor von

$$I_0 \quad = |\psi_I + \psi_{II}|^2 = \alpha(1 + \cos(\Delta\chi))$$

Einkristallinterferometer

- für den H-Beam:
  $I \rightarrow 2\times$Transmission, Reflexion;
  $II \rightarrow 3\times$Reflexion, daher zusätzliche Phasenverschiebung von π und ungleiche Amplituden

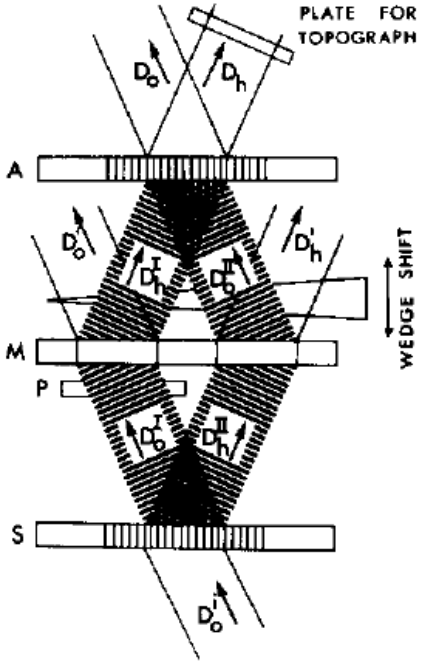


- für die Intensität am Detektor D_H

$$I_H = |\psi_I + \psi_{II}|^2 = \beta - \alpha\cos(\Delta\chi)$$

Einkristallinterferometer

- für den H-Beam:
  $I \rightarrow 2\times$Transmission, Reflexion;
  $II \rightarrow 3\times$Reflexion, daher zusätzliche Phasenverschiebung von π und ungleiche Amplituden



- für die Intensität am Detektor D_H

$$I_H = |\psi_I + \psi_{II}|^2 = \beta - \alpha\cos(\Delta\chi)$$

COW-Experiment(e)

- Nachweis gravitationsbedingter Phasenverschiebung von Neutronen-Materiewellen
- Reihe von Experimente benannt nach Robert Colella, Albert Overhauser, Samuel Werner
- erstes derartiges Experiment 1975 durchgeführt; veröffentlicht in Phys. Rev. Lett. **23**, 1472 (1975)

- Startpunkt darauf aufbauender Experimente (Abweichungen zur Thoerie bis heute nicht vollständig verstanden)

COW-Experiment(e)

- Aufbau

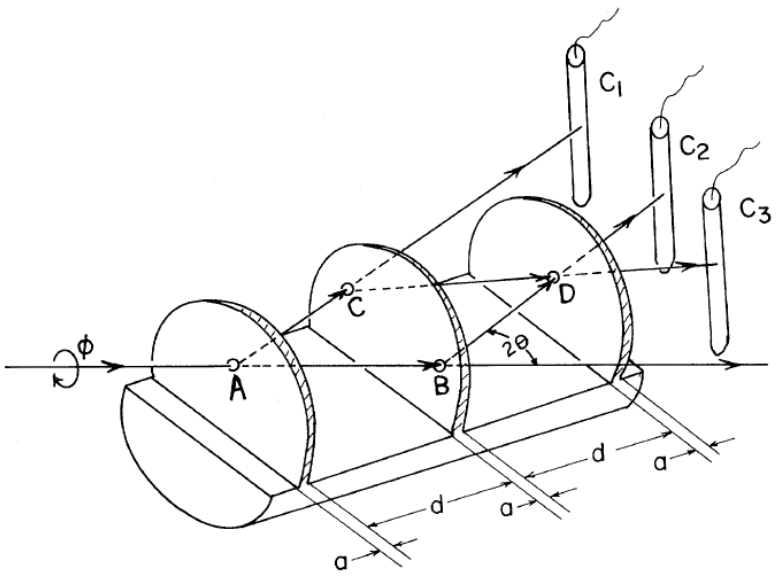


Abbildung: Colella *et al.*, Phys. Rev. Lett. **23**, 1247 (1975)

- für den Phasenunterschied bei Rotation in Näherung

$$\Delta\chi = -\frac{4\pi\lambda g m^2 d^2 \tan\theta}{h^2} \cdot \sin\phi$$

COW-Experiment(e)

- Aufbau

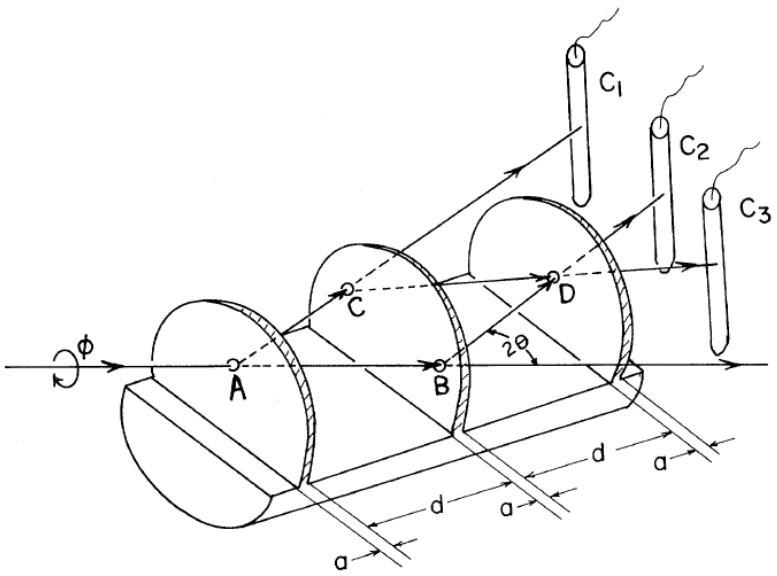


Abbildung: Colella *et al.*, Phys. Rev. Lett. **23**, 1247 (1975)

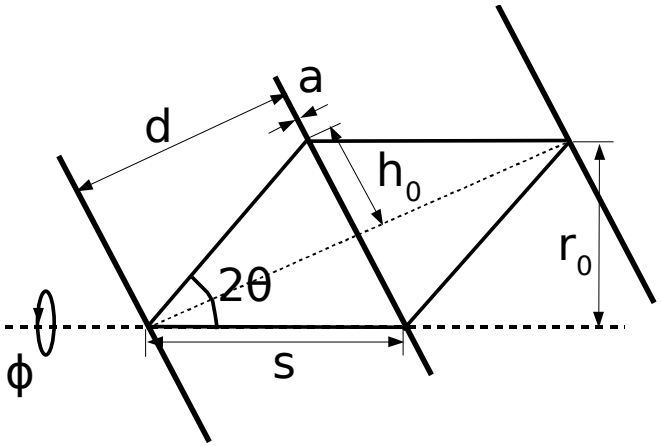
- für den Phasenunterschied bei Rotation in Näherung

$$\Delta\chi = -\frac{4\pi\lambda g m^2 d^2 \tan\theta}{h^2} \cdot \sin\phi$$

COW-Experiment(e)

- Phasenunterschied

  $\Delta\chi = s\Delta k$, s der Wegunterschied in unterschiedlicher Höhe



- zu Δk: E Gesamtenergie des Systems (m: Neutronenmasse, g: Fallbeschleunigung, ϕ: Rotationswinkel, $r(\phi)$ Höhe des Neutronenstrahls):

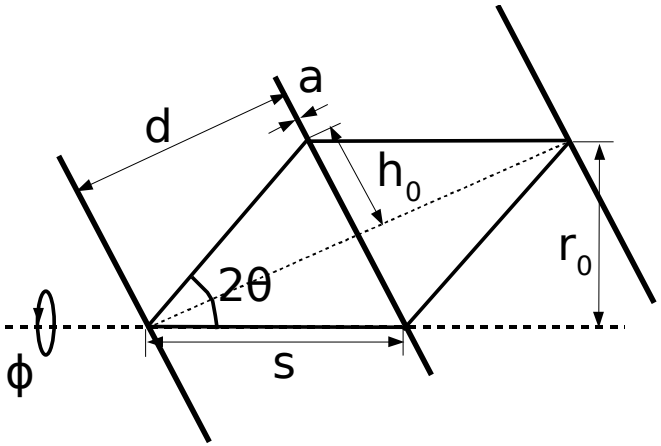
$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k_0^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + mgr(\phi)$$

$$\Leftrightarrow mgr(\phi) = -\frac{\hbar^2}{2m}\left(k^2 - k_0^2\right)$$

COW-Experiment(e)

- Phasenunterschied

  $\Delta\chi = s\Delta k$, s der Wegunterschied in unterschiedlicher Höhe



- zu Δk: E Gesamtenergie des Systems (m: Neutronenmasse, g: Fallbeschleunigung, ϕ: Rotationswinkel, $r(\phi)$ Höhe des Neutronenstrahls):

$$
\begin{aligned}
E &= \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k_0^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + mgr(\phi) \\
\Leftrightarrow mgr(\phi) &= -\frac{\hbar^2}{2m}\left(k^2 - k_0^2\right)
\end{aligned}
$$

COW-Experiment(e)

- wenn kinetische Energie bei 20 meV, $mg \simeq 1.03$ neV/cm und maximaler Höehenunterschied ca. 5 cm

$$\begin{aligned} mgr(\phi) &\ll \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \\ \Rightarrow k^2 - k_0^2 &\simeq 2k_0(k-k_0) = 2k_0\Delta k \\ \Delta k &= -\frac{m^2 g r(\phi)}{\hbar^2 k_0} = -\frac{2\pi\lambda m^2 g r(\phi)}{h^2} \end{aligned}$$

- Rotation der Apparatur:

$$r(\phi) = r_0 \cdot \sin\phi$$

COW-Experiment(e)

- wenn kinetische Energie bei 20 meV, $mg \simeq 1.03$ neV/cm und maximaler Höehenunterschied ca. 5 cm

$$\begin{aligned} mgr(\phi) &\ll \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \\ \Rightarrow k^2 - k_0^2 &\simeq 2k_0(k-k_0) = 2k_0\Delta k \\ \Delta k &= -\frac{m^2 g r(\phi)}{\hbar^2 k_0} = -\frac{2\pi\lambda m^2 g r(\phi)}{h^2} \end{aligned}$$

- Rotation der Apparatur:

$$r(\phi) = r_0 \cdot \sin\phi$$

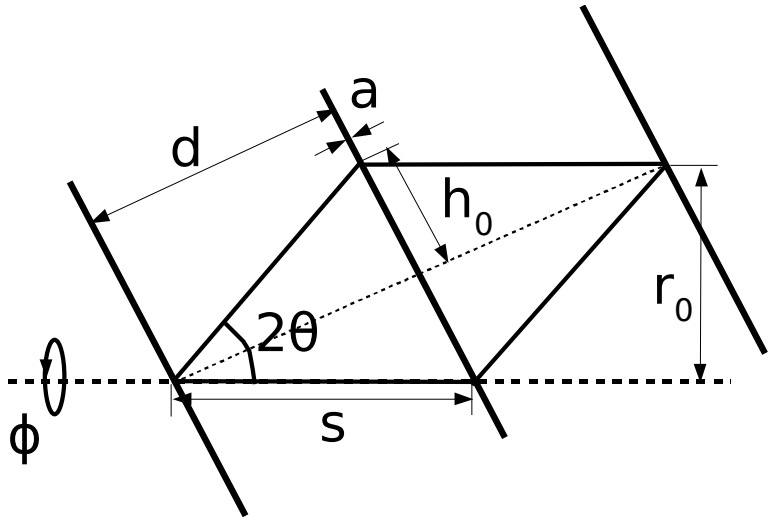
COW-Experiment(e)

- bis jetzt:

$$\Delta\chi = -\frac{2\pi\lambda g m^2}{h^2} \cdot s r_0 \sin\phi$$

- unter Vernachlässigung der Plattendicke:

$$s \cdot r_0 = 2d \cdot h_0 = 2d^2 \tan\theta$$



COW-Experiment(e)

- einerseits:

$$\Delta\chi = -\frac{4\pi\lambda g m^2 d^2 \tan\theta}{h^2} \cdot \sin\phi := -q_{grav} \cdot \sin\phi$$

an den Detektoren

$$I(\Delta\chi) = I_H - I_0 = \beta - \alpha - 2\alpha\cos(-q_{grav} \cdot \sin\phi)$$

COW-Experiment(e) Ergebnisse

Messung $I(\Delta\chi) = I_H - I_0$

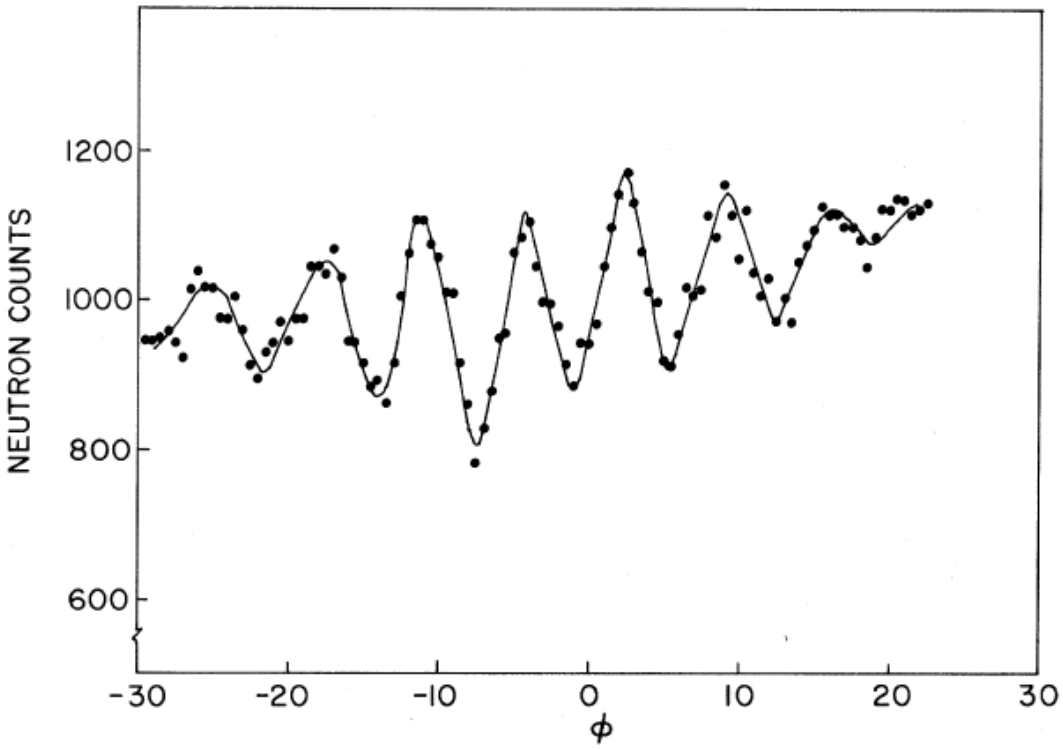


Abbildung: Colella *et al.*, Phys. Rev. Lett. **23**, 1247 (1975)

COW-Experiment(e) Abweichungen zur Theorie

- Amplituden stimmen nicht mit der Theorie überein
- Bestimmung von q_{grav} über Fouriertransformation der Daten
- erwartet $q_{grav} = 59.6$ aber gemessen 54.3
- Vermutung Δq entspricht der Verformung des Interferometers

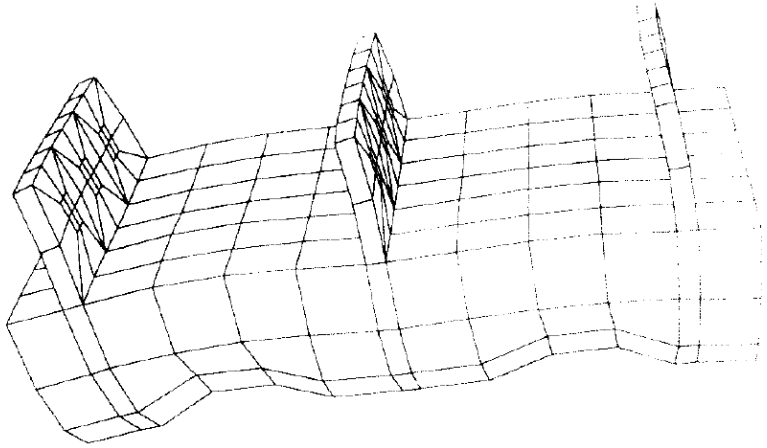


Abbildung: H. Layer, G. Greene, Phys. Lett. **A 155**, 450(1991)

COW-Experiment(e) Abweichungen zur Theorie

- Amplituden stimmen nicht mit der Theorie überein
- Bestimmung von q_{grav} über Fouriertransformation der Daten
- erwartet $q_{grav} = 59.6$ aber gemessen 54.3
- Vermutung Δq entspricht der Verformung des Interferometers

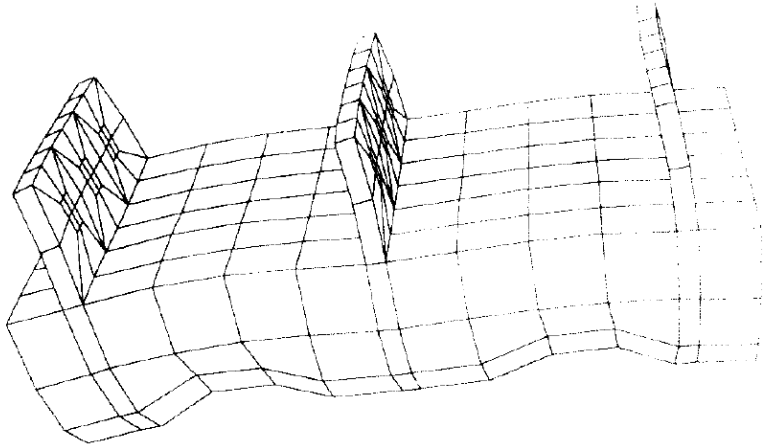


Abbildung: H. Layer, G. Greene, Phys. Lett. **A 155**, 450(1991)

COW-Experiment(e) Abweichungen zur Theorie

- Amplituden stimmen nicht mit der Theorie überein
- Bestimmung von q_{grav} über Fouriertransformation der Daten
- erwartet $q_{grav} = 59.6$ aber gemessen 54.3
- Vermutung Δq entspricht der Verformung des Interferometers

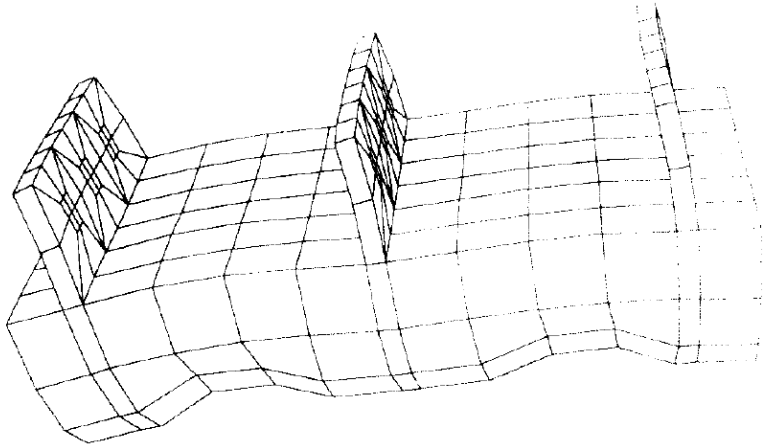


Abbildung: H. Layer, G. Greene, Phys. Lett. **A 155**, 450(1991)

COW-Experiment(e) Abweichungen zur Theorie

- Amplituden stimmen nicht mit der Theorie überein
- Bestimmung von q_{grav} über Fouriertransformation der Daten
- erwartet $q_{grav} = 59.6$ aber gemessen 54.3
- Vermutung Δq entspricht der Verformung des Interferometers

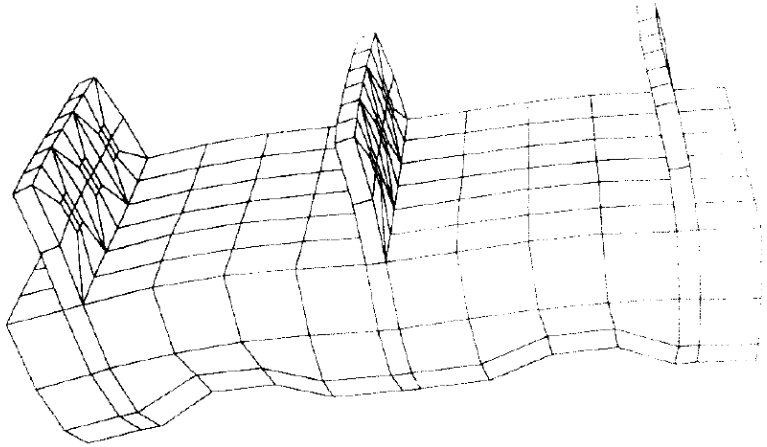


Abbildung: H. Layer, G. Greene, Phys. Lett. **A 155**, 450(1991)

COW-Experiment(e) Abweichungen zur Theorie

- Δq über Vergleich mit interferierenden Röntgenstrahlen
- im Orginalartikel Hoffnung q_{grav} auf 1% genau zu messen
- Hoffnung durch U. Bonse and T. Wroblewski (Phys. Rev. **D 30**, 1214(1984)) jäh zerstört:

  Dynamische Beugung: Neutronen bei WW am perfekten Kristall zusätzliche Phasenverschiebung und systematischer Fehler von -4%

COW-Experiment(e) Abweichungen zur Theorie

- Δq über Vergleich mit interferierenden Röntgenstrahlen
- im Orginalartikel Hoffnung q_{grav} auf 1% genau zu messen
- Hoffnung durch U. Bonse and T. Wroblewski (Phys. Rev. **D 30**, 1214(1984)) jäh zerstört:

  Dynamische Beugung: Neutronen bei WW am perfekten Kristall zusätzliche Phasenverschiebung und systematischer Fehler von -4%

COW-Experiment(e) Abweichungen zur Theorie

- aufbauende Experimente: bessere Aufhängungen, Berücksichtigung Erdrotation, unterschiedliches Verhalten von Photonen und Neutronen bei WW am Interferometer, Mehrstrahlinterferometer

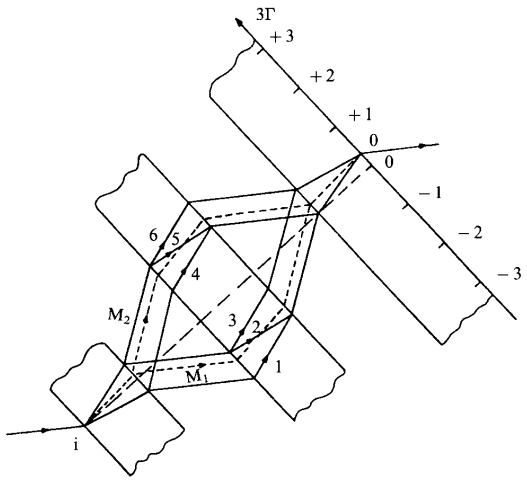


Abbildung: M.A. Horne Physica **137A**, 260(1986)

- letztes in der Reihe von K. Littrell *et al.* (1997)

  $\rightarrow$ Bestimmung von q_{grav} mit Abweichung von -1%

  Abweichung bis heute nicht verstanden

Experimernte mit kalten Neutronen

- Abweichungen vermutlich durch Einkristallinterferometer $\Rightarrow$ Überprüfen durch anderen Aufbau
- mit kalten Neutronen Möglichkeit Gitterinterferometer zu verwenden
- Übereinstimmung von Experiment und Theorie (G. van der Zouw *et al.* Nucl. Instr. and Meth. **A 440**, 568 (2000))
- Problem Auflösung der Wellenlänge führt zu Unsicherheit von 1%

- bis heute nicht zufriedendstellend geklärt, Präzisionsmessungen dann mit Atominterferometrie

Experimernte mit kalten Neutronen

- Abweichungen vermutlich durch Einkristallinterferometer $\Rightarrow$ Überprüfen durch anderen Aufbau
- mit kalten Neutronen Möglichkeit Gitterinterferometer zu verwenden
- Übereinstimmung von Experiment und Theorie (G. van der Zouw *et al.* Nucl. Instr. and Meth. **A 440**, 568 (2000))
- Problem Auflösung der Wellenlänge führt zu Unsicherheit von 1%

- bis heute nicht zufriedendstellend geklärt, Präzisionsmessungen dann mit Atominterferometrie

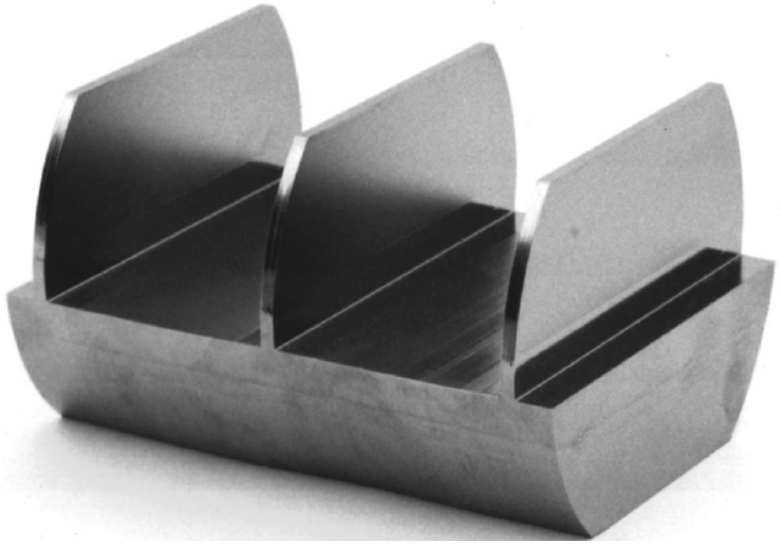
Experimernte mit kalten Neutronen

- Abweichungen vermutlich durch Einkristallinterferometer $\Rightarrow$ Überprüfen durch anderen Aufbau
- mit kalten Neutronen Möglichkeit Gitterinterferometer zu verwenden
- Übereinstimmung von Experiment und Theorie (G. van der Zouw *et al.* Nucl. Instr. and Meth. **A 440**, 568 (2000))
- Problem Auflösung der Wellenlänge führt zu Unsicherheit von 1%

- bis heute nicht zufriedendstellend geklärt, Präzisionsmessungen dann mit Atominterferometrie

Experimernte mit kalten Neutronen

- Abweichungen vermutlich durch Einkristallinterferometer $\Rightarrow$ Überprüfen durch anderen Aufbau
- mit kalten Neutronen Möglichkeit Gitterinterferometer zu verwenden
- Übereinstimmung von Experiment und Theorie (G. van der Zouw *et al.* Nucl. Instr. and Meth. **A 440**, 568 (2000))
- Problem Auflösung der Wellenlänge führt zu Unsicherheit von 1%

- bis heute nicht zufriedendstellend geklärt, Präzisionsmessungen dann mit Atominterferometrie

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit