

F4110
Fyzika atomárních soustav
letní semestr 2005 - 2006

VII.
Neutronová interferometrie

KOTLÁŘSKÁ 5. DUBNA 2006

Úvodem

- Planckova konstanta od teď bude rozhodující
- budeme sledovat komplementaritu částice – vlna
- nejprve kvalitativní pohled na
de Broglieho/Schrödingerovy vlny
- pak něco o neutronech
- neutronová interference – mezi nejkrásnějšími
pokusy s vlnovými vlastnostmi částic
- teoretický přístup fyzikální optiky – analogický teorii
optického Machova-Zehnderova interferometru

Schrödingerovy vlny

Schrödingerovy vlny

Volná částice:

de Broglie

rovinná vlna

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{p} / \hbar, \quad \omega = E / \hbar$$

$$\mathbf{k} \rightarrow -\mathbf{k}$$

$$\Psi'(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})}$$

dvě řešení ... stoj. vlna

$$E \rightarrow E - E_0$$

$$\Psi''(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})} \cdot e^{+i\omega_0 t}$$

volba počátku energií

tomu odpovídá

Schrödingerova
rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t)$$

• 1. řádu v čase ... poč. podm. $\Psi(\mathbf{r}, t_0)$

• lineární ... princip superposice

Schrödingerovy vlny

Volná částice:

rovinná vlna

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}$$

$\mathbf{k} \rightarrow -\mathbf{k}$

$$\Psi'(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})}$$

$E \rightarrow E - E_0$

$$\Psi''(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})} \cdot e^{+i\omega_0 t}$$

tomu odpovídá

Schrödingerova
rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t)$$

de Broglie

$$\mathbf{k} = \mathbf{p} / \hbar, \quad \omega = E / \hbar$$

dvě řešení ... stoj. vlna

volba počátku energií

- 1. řádu v čase ... poč. podm. $\Psi(\mathbf{r}, t_0)$
- lineární ... princip superposice

Částice ve vnějším
poli:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r})\Psi(\mathbf{r}, t)$$

Schrödingerovy vlny

Volná částice:

rovinná vlna $\Psi(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}$

$\mathbf{k} \rightarrow -\mathbf{k}$ $\Psi'(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})}$

$E \rightarrow E - E_0$ $\Psi''(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})} \cdot e^{+i\omega_0 t}$

de Broglie

$\mathbf{k} = \mathbf{p} / \hbar, \quad \omega = E / \hbar$

dvě řešení ... stoj. vlna

volba počátku energií

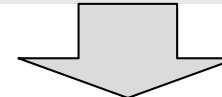
tomu odpovídá
Schrödingerova
rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t)$$

- 1. řádu v čase ... poč. podm. $\Psi(\mathbf{r}, t_0)$
- lineární ... princip superposice

Částice ve vnějším
poli:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r})\Psi(\mathbf{r}, t)$$



Schrödingerovy vlny

Volná částice:

de Broglie

rovinná vlna $\Psi(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}$ $\mathbf{k} = \mathbf{p} / \hbar, \quad \omega = E / \hbar$

$\mathbf{k} \rightarrow -\mathbf{k}$ $\Psi'(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})}$

dvě řešení ... stoj. vlna

$E \rightarrow E - E_0$ $\Psi''(\mathbf{r}, t) = A e^{-i(\omega t + \mathbf{k}\mathbf{r})} \cdot e^{+i\omega_0 t}$ volba počátku energií

tomu odpovídá

Schrödingerova rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t)$$

- 1. řádu v čase ... poč. podm. $\Psi(\mathbf{r}, t_0)$
- lineární ... princip superposice

Částice ve vnějším poli:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r})\Psi(\mathbf{r}, t)$$

stacionární řešení

$$+ \Delta \psi(\mathbf{r}) + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(\mathbf{r}))\psi(\mathbf{r}) = 0, \quad \Psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}$$

$$\underbrace{\frac{2m}{\hbar^2} (E - V(\mathbf{r}))}_{k^2(\mathbf{r})}$$

velikost lokálního vlnového vektoru

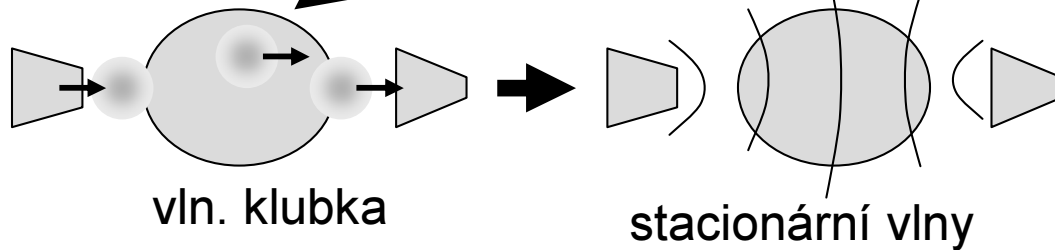
Schrödingerovy vlny – kvasiklasická aproximace

Částice ve vnějším poli:
Schrödingerova rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}) \Psi(\mathbf{r}, t) \quad \Psi(\mathbf{r}, t_0)$$

stacionární řešení $+\Delta \psi(\mathbf{r}) + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(\mathbf{r})) \psi(\mathbf{r}) = 0, \quad \Psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}$

velikost
lokálního vlnového vektoru



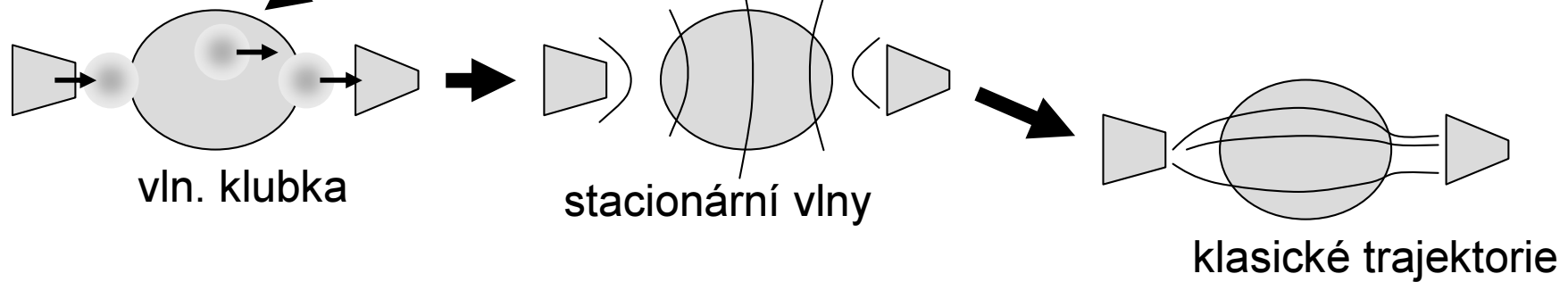
Schrödingerovy vlny – kvasiklasická aproximace

Částice ve vnějším poli:
Schrödingerova rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}) \Psi(\mathbf{r}, t) \quad \Psi(\mathbf{r}, t_0)$$

stacionární řešení $+\Delta \psi(\mathbf{r}) + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(\mathbf{r})) \psi(\mathbf{r}) = 0, \quad \Psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}$

velikost lokálního vlnového vektoru



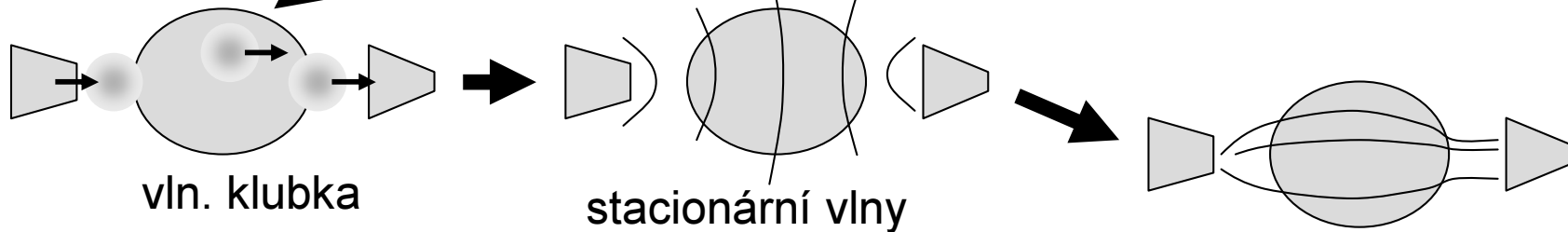
Schrödingerovy vlny – kvasiklasická aproximace

Částice ve vnějším poli:
Schrödingerova rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}) \Psi(\mathbf{r}, t) \quad \Psi(\mathbf{r}, t_0)$$

stacionární řešení $+\Delta \psi(\mathbf{r}) + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(\mathbf{r})) \psi(\mathbf{r}) = 0, \quad \Psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}$

velikost lokálního vlnového vektoru



vlastně Fresnelova aproximace fys. optiky

klasické trajektorie

$$\psi(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \cdot \exp(i/\hbar \cdot S)$$

$$S(\mathbf{r}) = \hbar \int ds \cdot k(\mathbf{r}(s))$$

INDEX LOMU

$$k(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E - V(\mathbf{r}))} = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} E} \sqrt{1 - \frac{V(\mathbf{r})}{E}}$$

$$k_0 \cdot n(\mathbf{r})$$



Neutrony

Proč právě neutronová interferometrie

Jistě i jiné částice byly použity ... neutrony ale poskytují

mimořádně citlivé interferometrické metody

posloužily k provedení mimořádně krásných experimentů

částice	náboj	hmotnost	spin	magn. moment	doba života
elektron	$-e$	$m_e = 0,00055 \text{ u}$	$\frac{1}{2}$	$1,001\mu_e$	stabilní
proton	$+e$	$1,00782 \text{ u}$	$\frac{1}{2}$	$2,793\mu_p$	stabilní
neutron	0	1,00866 u	$\frac{1}{2}$	$-1,913\mu_p$	932 s

V látce neutron interaguje prostřednictvím jaderných sil nebo magn. momentu ... kontaktní interakce. Většinou spíše slabá. Jinak prochází

Žádoucí vlnová délka např. $1.8 \text{ \AA} = 0.18 \text{ nm}$

$$\lambda = 2\pi\hbar / p = 2\pi / k, \quad p = \sqrt{2mE}, \quad v = p / m$$

částice	energie eV	rychlost m/s
elektron	46.4	4 041 000
neutron	$0.0253 = 293 k_B$	2 200

Proč právě neutronová interferometrie

rozumně velká klubka prolétající aparaturou

neutrony mimořádně krásný

žije mnohem déle, než trvá jeho průchod aparaturou

částice	náboj	hmotnost	spin	magn. moment	doba života
elektron	$-e$	$m_e = 0,00055 \text{ u}$	$\frac{1}{2}$	$1,001 \mu_e$	stabilní
proton	$+e$	$1,00782 \text{ u}$	$\frac{1}{2}$	$2,793 \mu_p$	stabilní
neutron	0	1,00866 u	$\frac{1}{2}$	$-1,913 \mu_p$	932 s

tepelné elektrony snadno se získají termalisací neutronů ze zdroje

střednictvím jaderných spíše slabá. Jinak pro

$8 \text{ \AA} = 0.18 \text{ nm}$

$2\pi/k, p = \sqrt{2mE}, v = p/m$

0.1 m urazí za 45 mikrosekund, velmi pohodlná doba

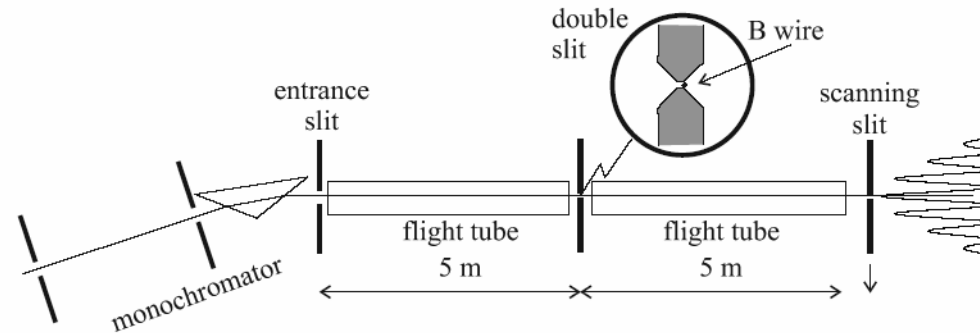
částice	energie eV	rychlost m/s
elektron	46.4	4 041 000
neutron	0.0253 = 293 k_B	2 200

Experimenty s interferencí neutronů

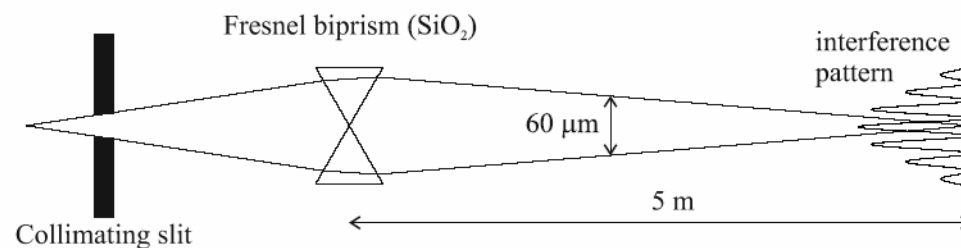
Tři příklady aparatur ... které nemáme dnes na mysli

ohyb na dvojštěrbině

otázka: proč zrovna bor jako materiál pro dvojštěrbinu



neutronové biprisma
všimněte si ale biprismatu.
jsou to opravdové křemenné hranoly, ale uspořádané jako rozptylka: index lomu $n < 1$



magnetický rozptyl na mřížce domén v železe

tato mřížka vzniká v železe spontánně a je dostatečně pravidelná pro vznik interferencí

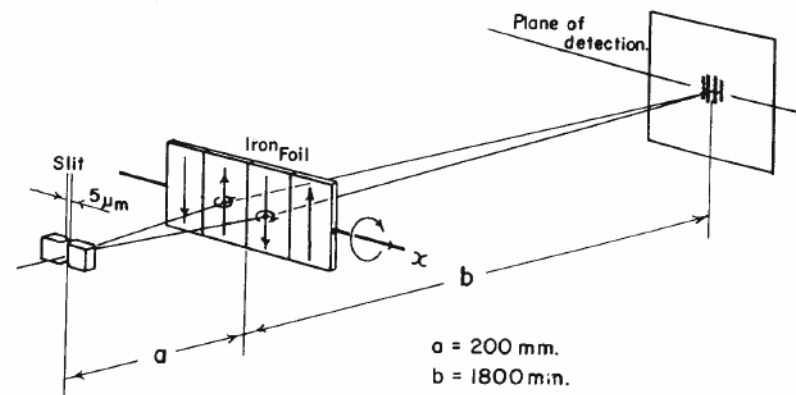


Figure 2.5.: Some examples of neutron interferometers using wavefront division: a double slit interferometer (Zeilinger et al. 1988a), the Fresnel biprism by Maier-Leibniz and Springer (1962) and diffraction from a ferromagnetic domain boundary (Klein and Opat 1976).

neutronová dvojštěrbina

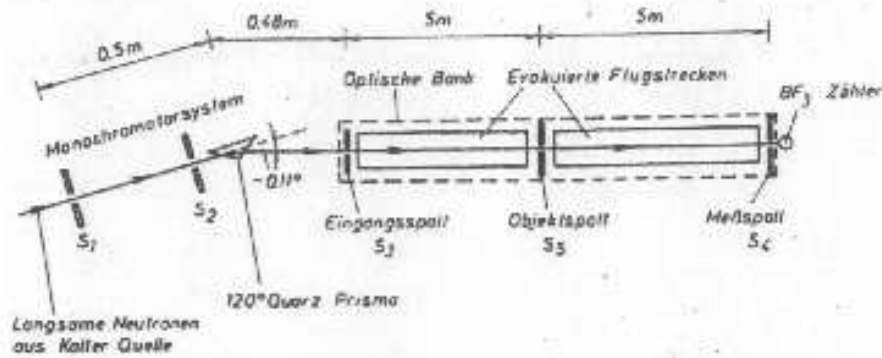
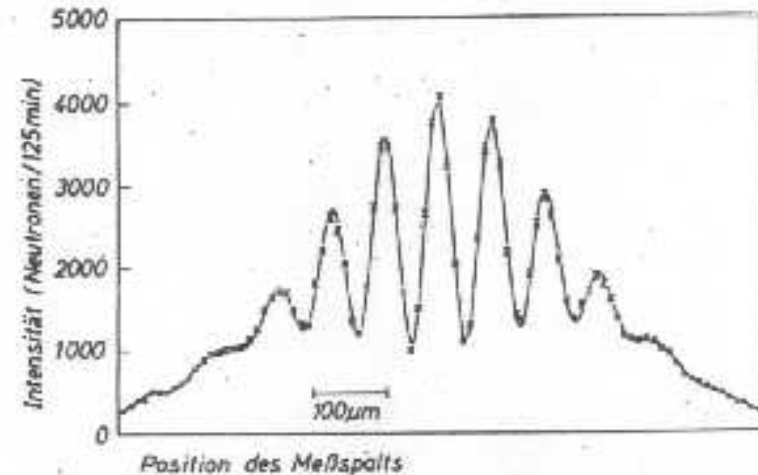
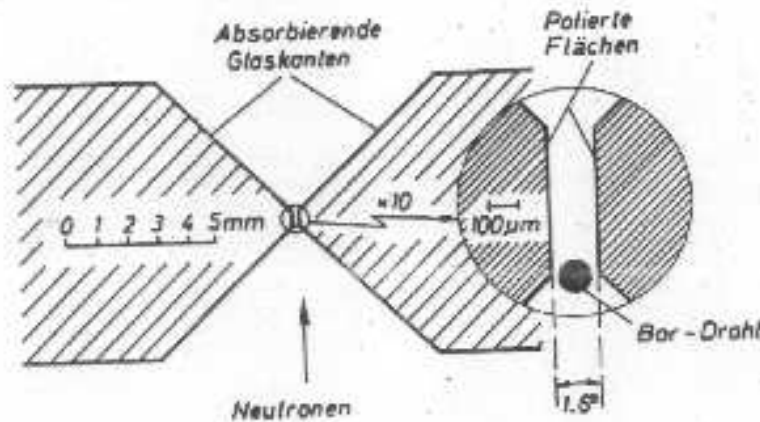
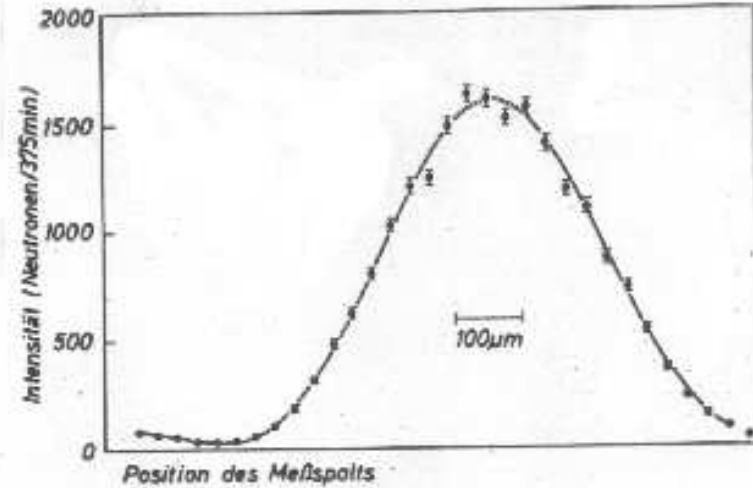
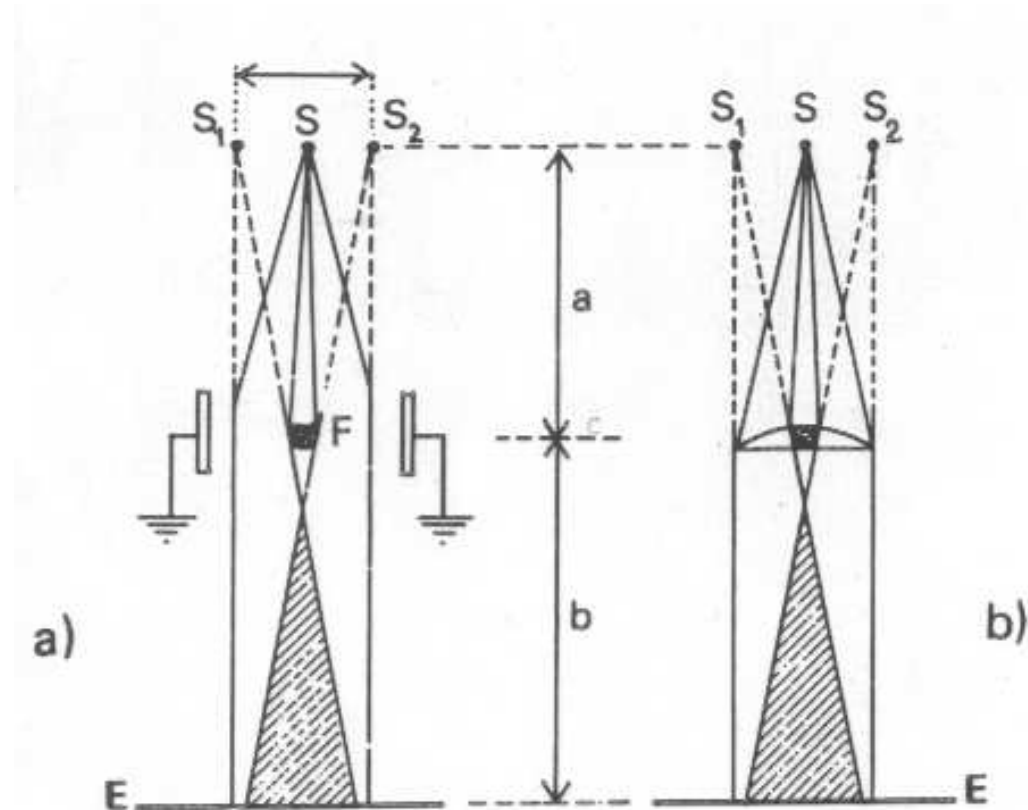


Abbildung 2 Die neutronenoptische Bank. Von den aus der Kalten Quelle des Reaktors kommenden Neutronen wird eine bestimmte Wellenlänge durch den Monochromator ausgewählt. Die Spalte S_3 und S_4 sind je $20 \mu\text{m}$ breit. Als Objektspalt wurde entweder der Einzelspalt oder der Doppelspalt verwendet.



srovnání se známějšími biprismaty



ELEKTRONOVÉ

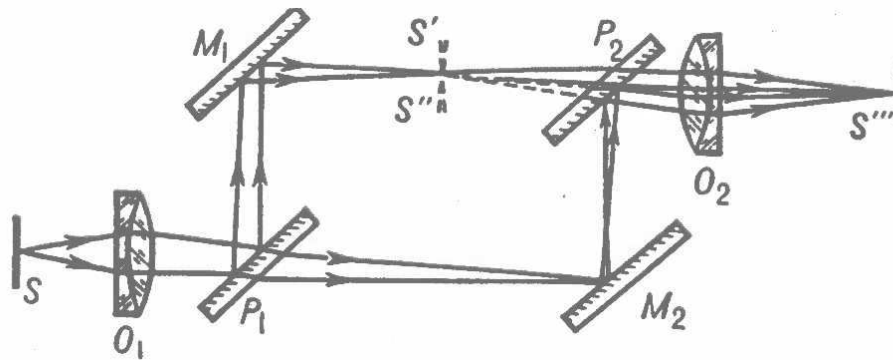
OPTICKÉ

BIPRIZMA

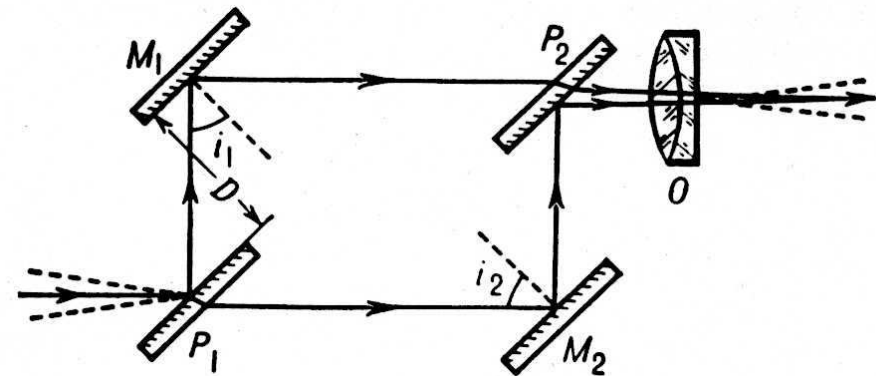
Neutrony: Mach-Zehnderův interferometr

Inspirace z fyzikální optiky: Interferometr systému Mach-Zehnder

Uvedené systémy pro interferenci neutronů nedávaly prostorově oddělené dráhy, do kterých by se daly vkládat vzorky, kompenzační a justační členy atd. V optice však byl takový systém dávno znám:



Mach-Zehnder



Roschdestwenski

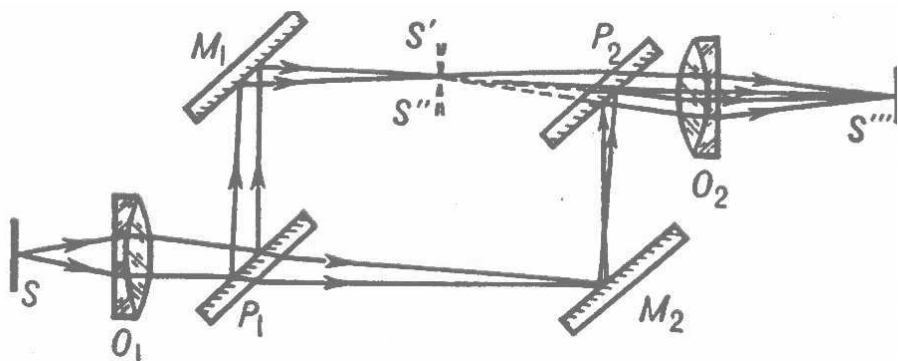
Čím se liší: u MZ jsou paralelní dvojice MM, PP, u R zase MP, MP.

Vzájemné natočení obou dvojic určuje šířku interferenčních proužků v prostoru. Čím je úhel menší, proužky jsou širší.

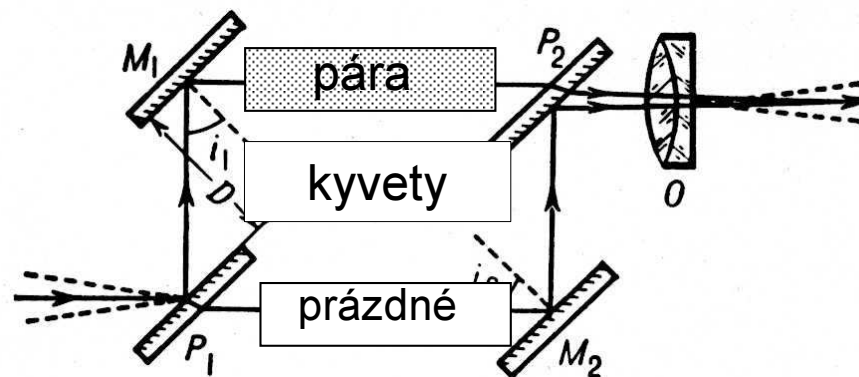
Oba svazky jsou symetrické ... stejný počet odrazů i průchodů, stejné dráhy, které lze ještě dokompenzovat

Optický interferometr systému Mach-Zehnder

Uvedené systémy pro interferenci neutronů nedávaly prostorově oddělené dráhy, do kterých by se daly vkládat vzorky, kompenzační a justační členy atd. V optice však byl takový systém dávno znám:



Mach-Zehnder



Roschdestwenski

Čím se liší: u MZ jsou paralelní dvojice MM, PP, u R zase MP, MP.

Vzájemné natočení obou dvojic určuje šířku interferenčních proužků v prostoru. Čím je úhel menší, proužky jsou širší.

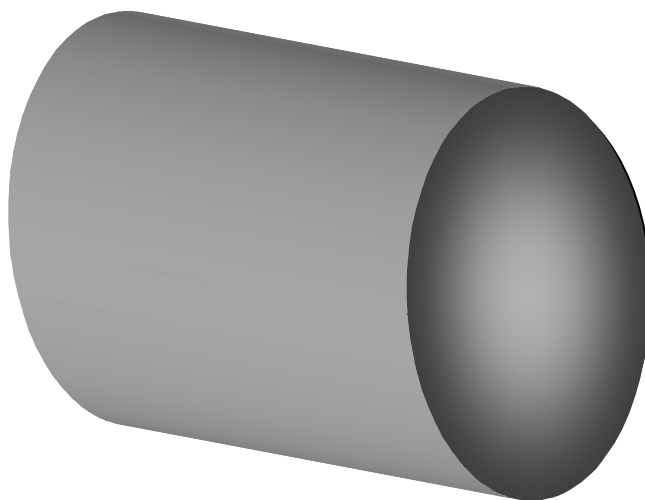
Oba svazky jsou symetrické ... stejný počet odrazů i průchodů, stejné dráhy, které lze ještě dokompenzovat

Známa aplikace: měření anomální disperse v atomových parách

Si neutronový interferometr podle Bonseho a Raucha (1974)

Uskutečnitelný díky rozvoje křemíkové technologie pro polovodičový průmysl. Už tenkrát uměli vypěstovat monokrystal křemíku o průměru 8 i 10 cm (3 a 4 inche) a s vysokou dokonalostí

Dnes jsou Si monokrystaly základem mezinárodních metrologických systémů – určení Avogadrovy konstanty atd.

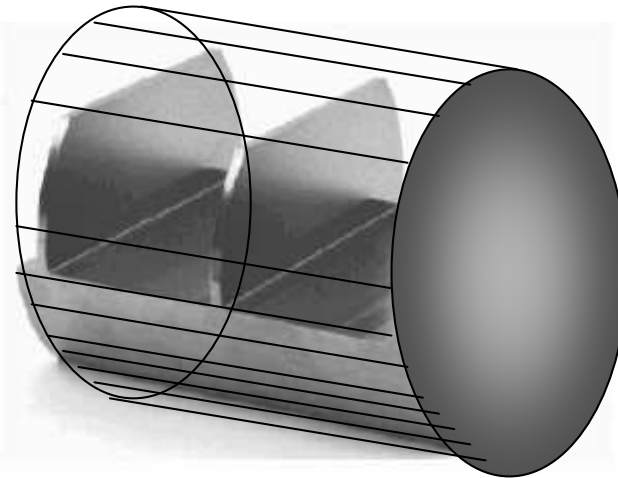


monokrystal
ve tvaru válce

Si neutronový interferometr podle Bonseho a Raucha (1974)

Uskutečnitelný díky rozvoje křemíkové technologie pro polovodičový průmysl. Už tenkrát uměli vypěstovat monokrystal křemíku o průměru 8 i 10 cm (3 a 4 inche) a s vysokou dokonalostí

Dnes jsou Si monokrystaly základem mezinárodních metrologických systémů – určení Avogadrovy konstanty atd.



monokrystal
ve tvaru válce

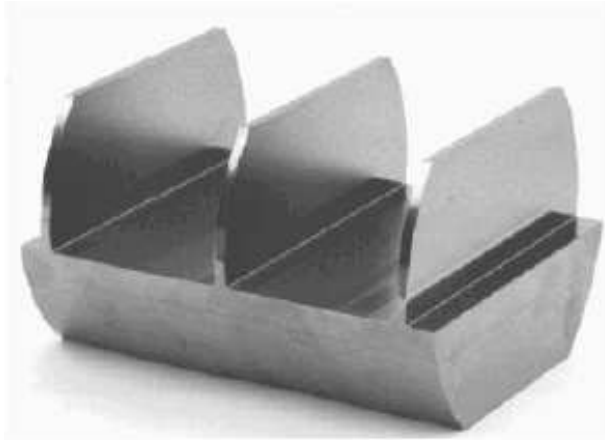
z něj se vyřeže
interferometr jako
celek

i vzdálené oblasti při
pečlivé práci uchovají
krystalografické
uspořádání na dálku

Si neutronový interferometr podle Bonseho a Raucha (1974)

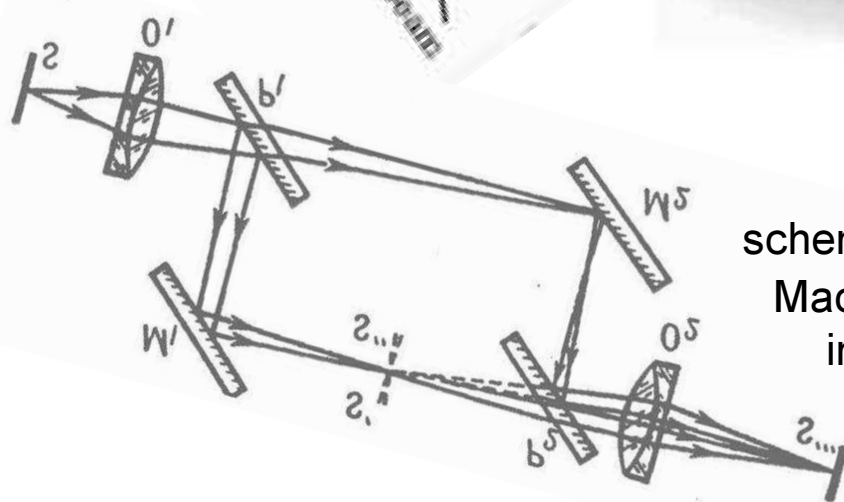
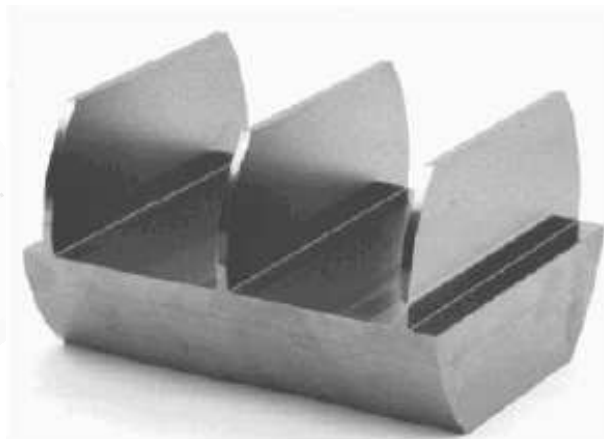
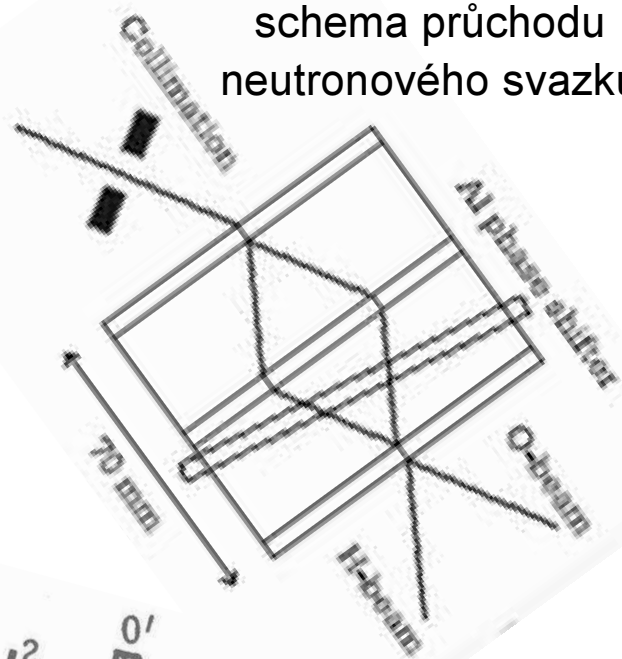
Uskutečnitelný díky rozvoje křemíkové technologie pro polovodičový průmysl. Už tenkrát uměli vypěstovat monokrystal křemíku o průměru 8 i 10 cm (3 a 4 inche) a s vysokou dokonalostí

Dnes jsou Si monokrystaly základem mezinárodních metrologických systémů – určení Avogadrovy konstanty atd.



Si neutronový interferometr podle Bonseho a Raucha (1974)

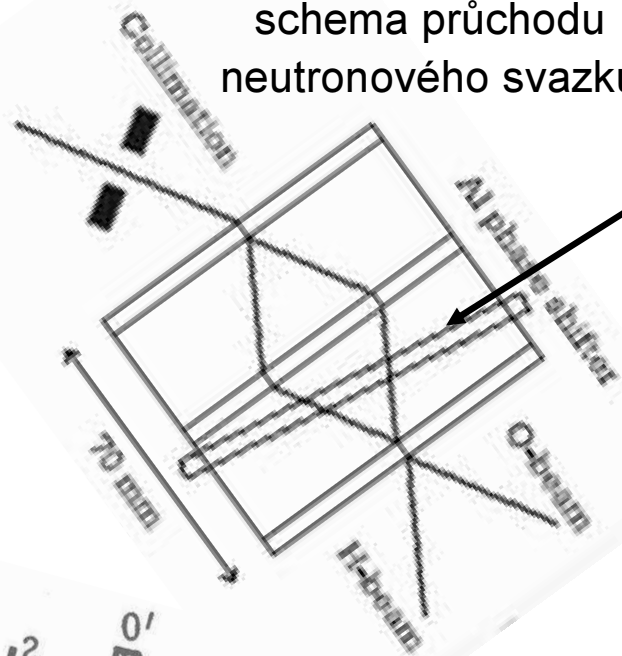
schema průchodu neutronového svazku



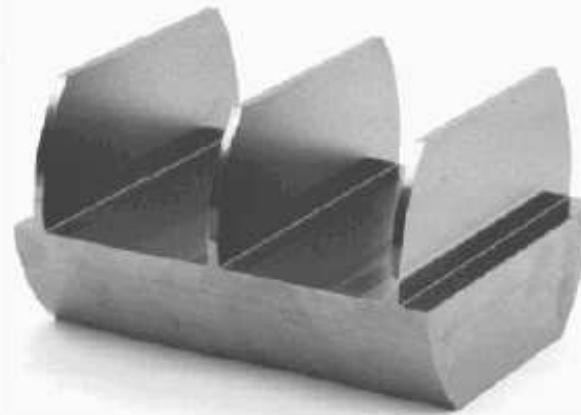
schema průchodu světla
Mach-Zehnderovým
interferometrem

Si neutronový interferometr podle Bonseho a Raucha (1974)

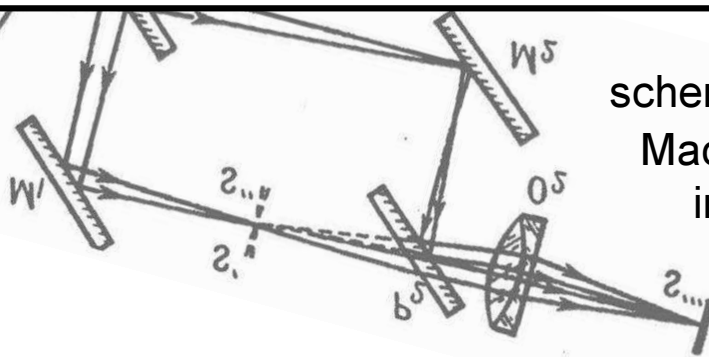
schema průchodu
neutronového svazku



**FÁZOVÝ
KOMPENZÁTOR**

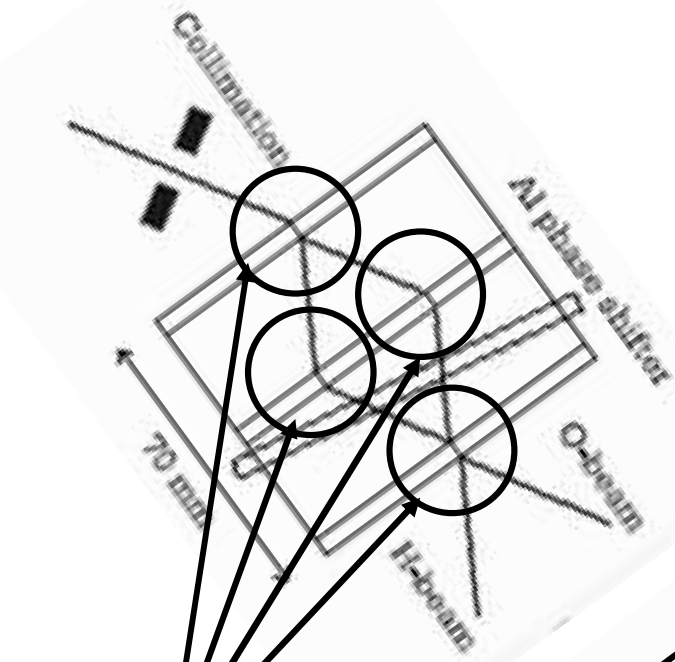


SYMETRICKÉ USPOŘÁDÁNÍ PAPRSKŮ

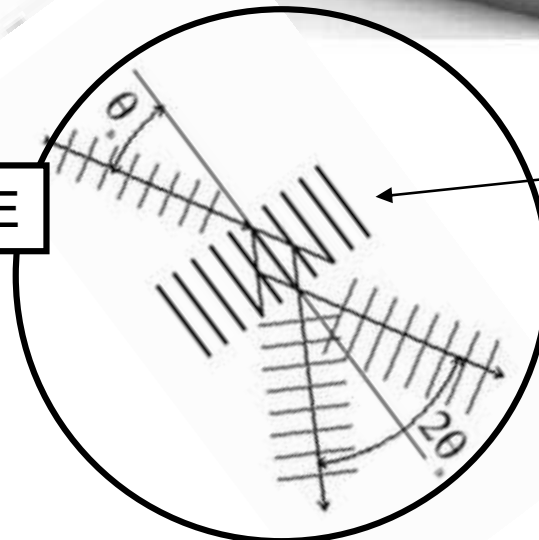
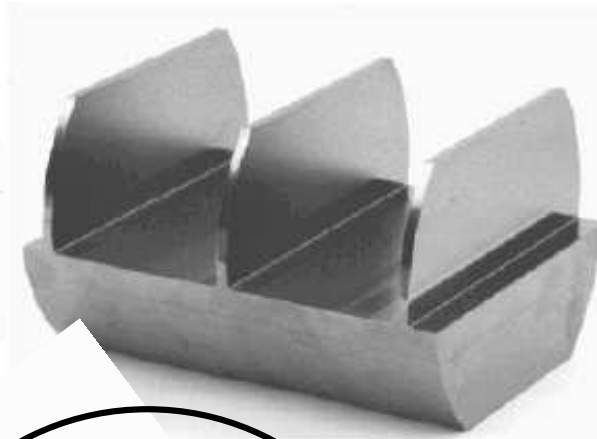


schema průchodu světla
Mach-Zehnderovým
interferometrem

Si neutronový interferometr podle Bonseho a Raucha (1974)

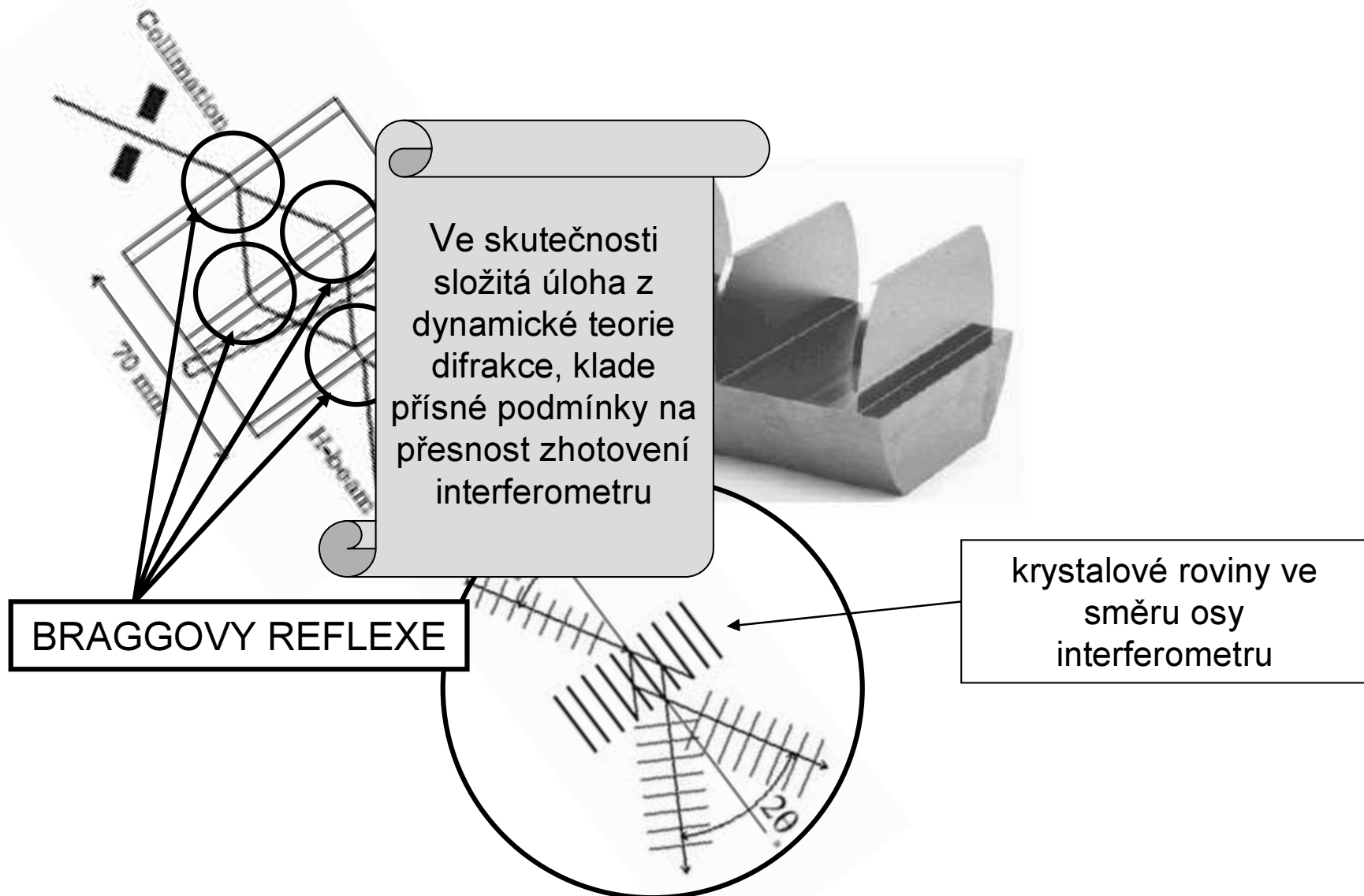


BRAGGOVY REFLEXE



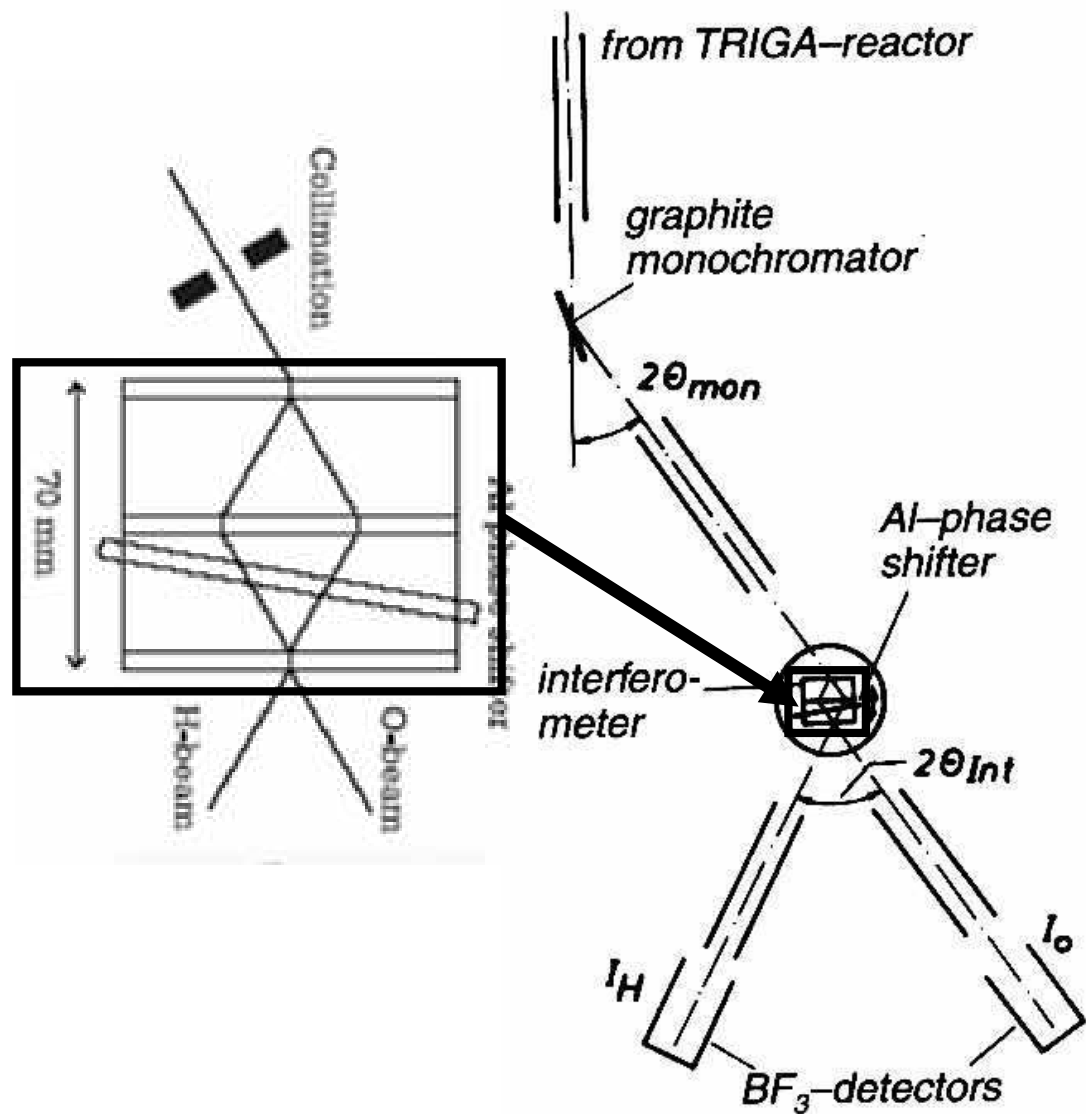
kryсталové roviny ve směru osy interferometru

Si neutronový interferometr podle Bonseho a Raucha (1974)



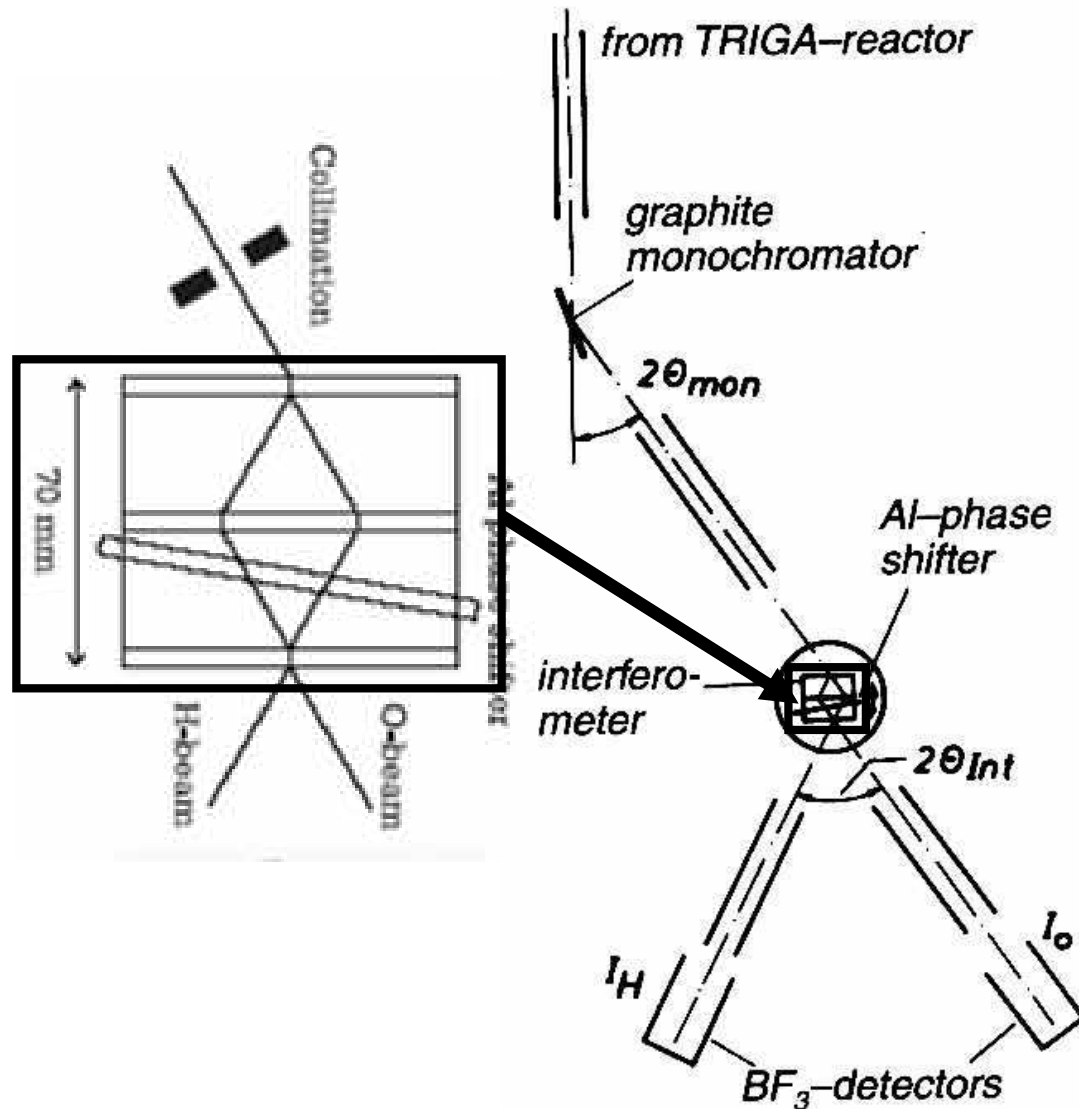
Celé zařízení

schema z r. 1974



Celé zařízení

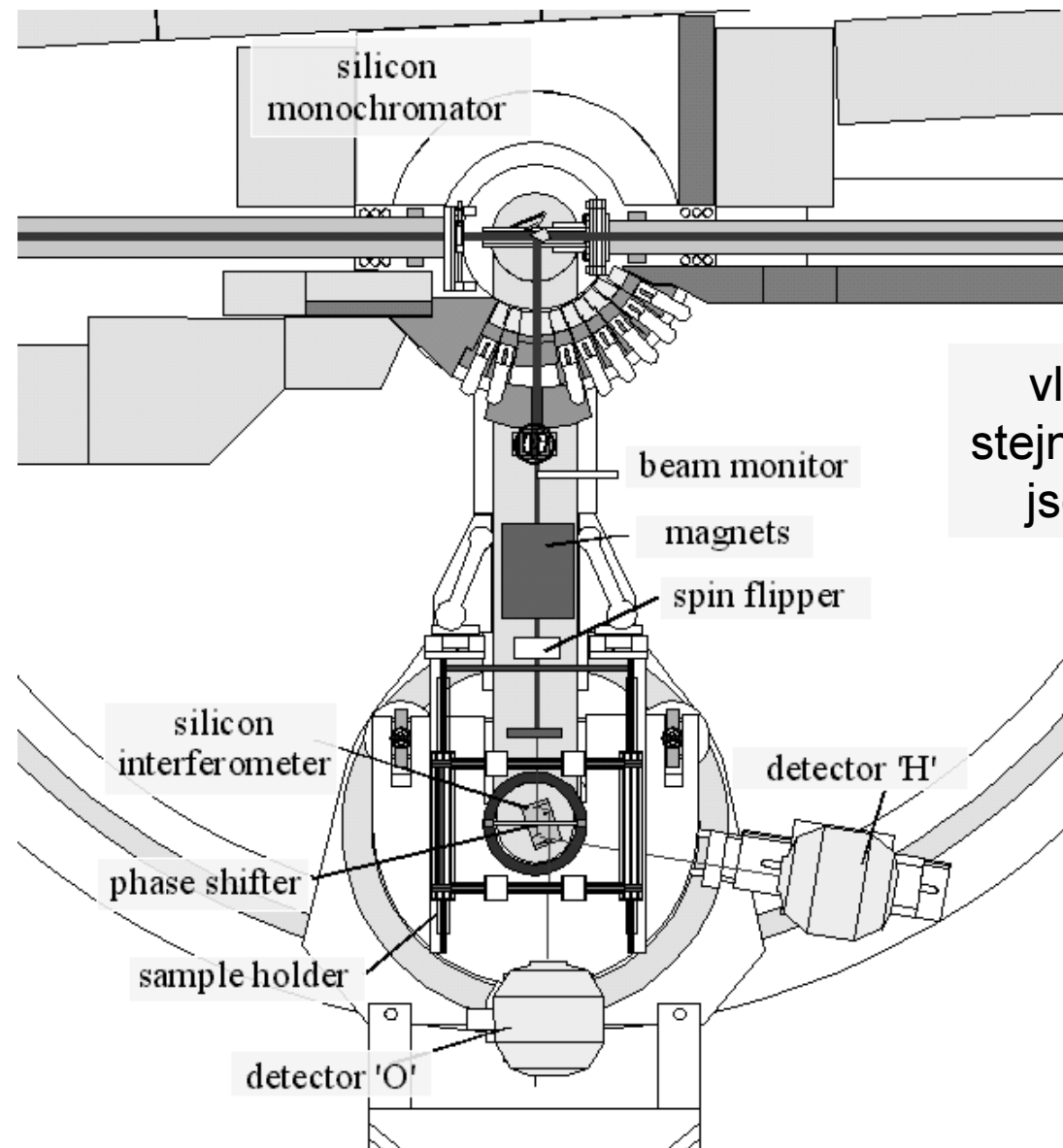
schema z r. 1974



KOMPLEMENTARITA V PRAXI

termalisace	lokalis. částice	<i>r</i>
kolimace	neurčité	
monochromatisace	vlna	<i>p</i>
dopadající svazek	neurčité	
vlastní experiment interference	vlna	<i>p</i>
vycházející svazky	neurčité	
detekce – redukce ztráta kvantové koherence	lokalis. částice	<i>r</i>

Současná verze instalovaná v ILL Grenoble



vlastně překvapivě
stejně, jenom parametry
jsou mnohem lepší

Kvantová gravimetrie

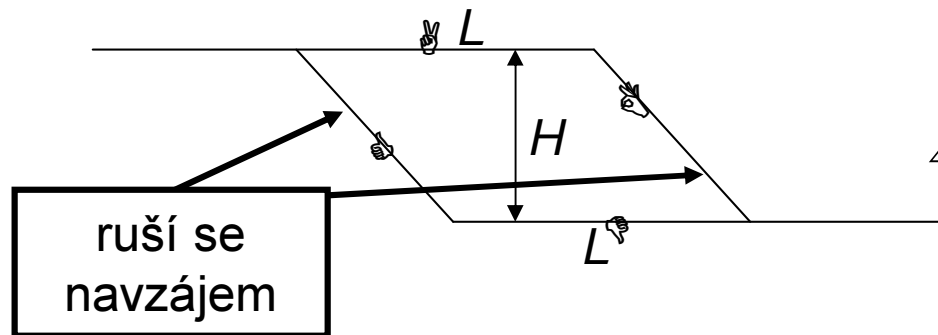
Interferenční gravimetrie

Zpravidla se vliv gravitace v kvantové mechanice zanedbává, jsou to malé síly.

Kolik tak činí gravitační potenciál neutronu v poli Zemské tíže?

$$V(x, y, z) = -mg(z - z_0) \approx -1.7 \times 10^{-27} \times 10 \times 0.1 / 1.6 \times 10^{-19} \approx 10^{-8} \text{ eV}$$

S tímto výsledkem můžeme trajektorie vzít jako bez účinku gravitačního pole



Dráhový rozdíl

$$\Delta S = k_0 \left\{ \int_{\uparrow} + \int_{\downarrow} - \int_{\downarrow} - \int_{\uparrow} \right\} ds \cdot n(\mathbf{r}(s))$$



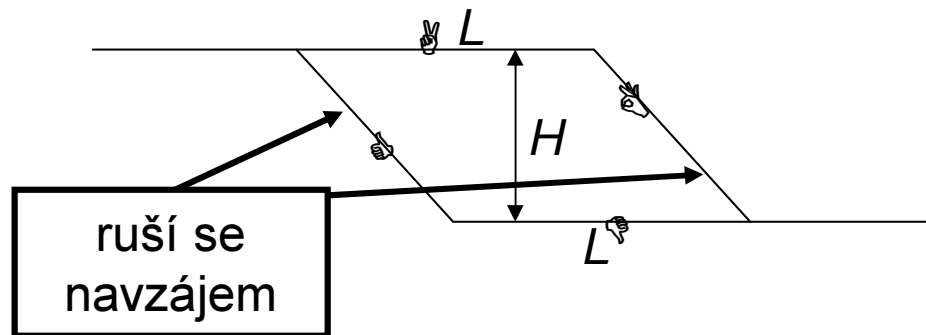
Interferenční gravimetrie

Zpravidla se vliv gravitace v kvantové mechanice zanedbává, jsou to malé síly.

Kolik tak činí gravitační potenciál neutronu v poli Zemské tíže?

$$V(x, y, z) = -mg(z - z_0) \approx -1.7 \times 10^{-27} \times 10 \times 0.1 / 1.6 \times 10^{-19} \approx 10^{-8} \text{ eV}$$

S tímto výsledkem můžeme trajektorie vzít jako bez účinku gravitačního pole



Dráhový rozdíl

$$\begin{aligned} \Delta S &= k_0 \left\{ \int_{\downarrow} + \int_{\uparrow} - \int_{\uparrow} - \int_{\downarrow} \right\} ds \cdot n(\mathbf{r}(s)) \\ &= k_0 \left\{ \int_{\downarrow} - \int_{\uparrow} \right\} ds \cdot [-V(\mathbf{r}(s))] / 2E \end{aligned}$$

$$n(\mathbf{r}) = \sqrt{1 - \frac{V(\mathbf{r})}{E}} \approx 1 - \frac{V(\mathbf{r})}{2E}$$

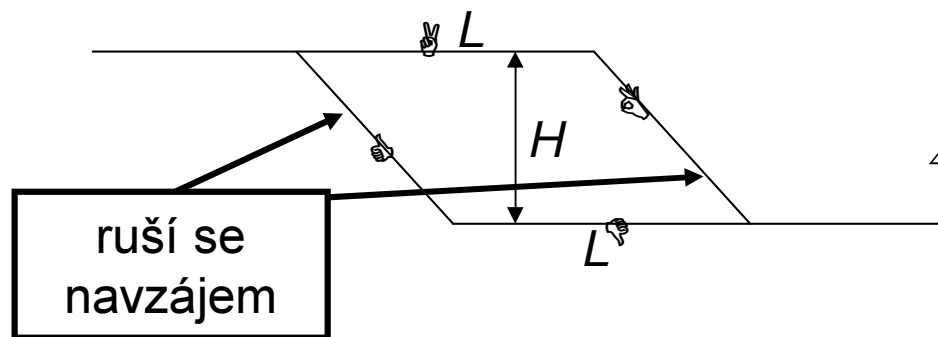
Interferenční gravimetrie

Zpravidla se vliv gravitace v kvantové mechanice zanedbává, jsou to malé síly.

Kolik tak činí gravitační potenciál neutronu v poli Zemské tíže?

$$V(x, y, z) = -mg(z - z_0) \approx -1.7 \times 10^{-27} \times 10 \times 0.1 / 1.6 \times 10^{-19} \approx 10^{-8} \text{ eV}$$

S tímto výsledkem můžeme trajektorie vzít jako bez účinku gravitačního pole



Dráhový rozdíl

$$\begin{aligned} \Delta S &= k_0 \left\{ \int_{\downarrow} + \int_{\uparrow} - \int_{\downarrow} - \int_{\uparrow} \right\} ds \cdot n(\mathbf{r}(s)) \\ &= k_0 \left\{ \int_{\downarrow} - \int_{\uparrow} \right\} ds \cdot [-V(\mathbf{r}(s))] / 2E \end{aligned}$$

$$\Delta S = k_0 \times L \times mgH / 2E$$

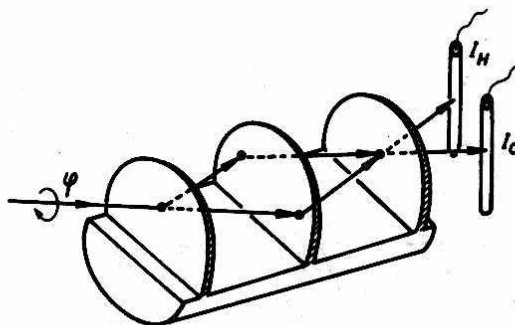
plocha
obemknutá
drahami

měníme
natáčením

$$= LH \times g \times 2\pi \times (m/h)^2 \times \lambda_0$$

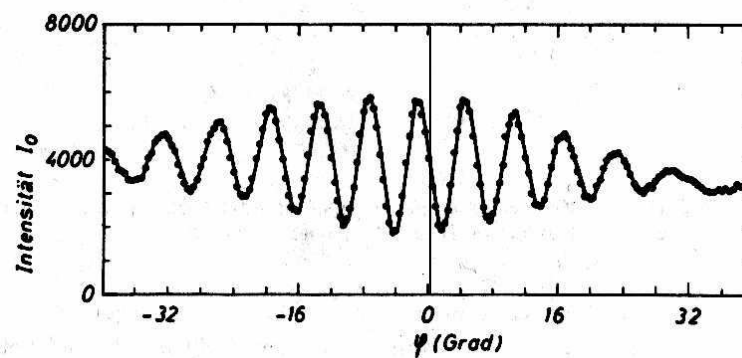
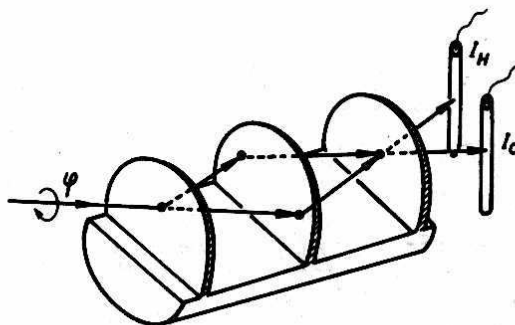
Interferenční gravimetrie: jeden z prvních výsledků

osa natáčení je
vodorovná



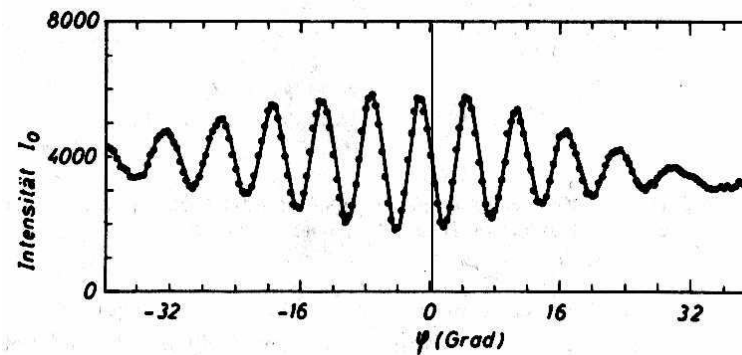
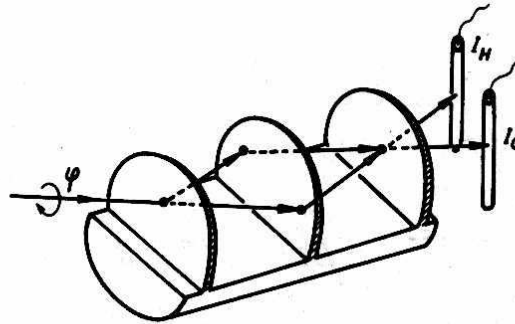
Interferenční gravimetrie: jeden z prvních výsledků

osa natáčení je
vodorovná



Interferenční gravimetrie: jeden z prvních výsledků

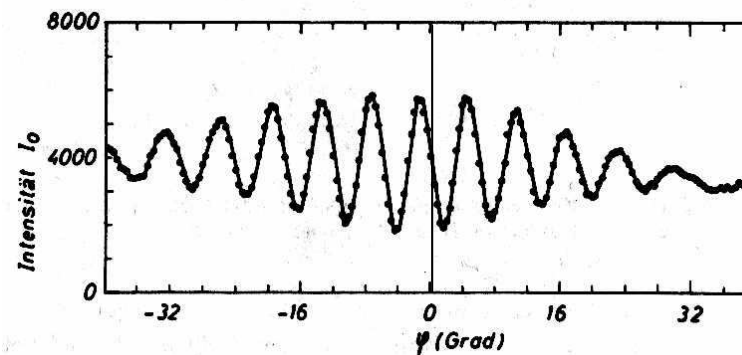
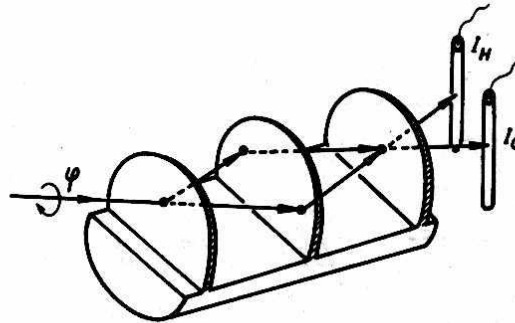
osa natáčení je
vodorovná



COW experiment ... Collela, Overhauser, Werner

Interferenční gravimetrie: jeden z prvních výsledků

osa natáčení je
vodorovná



❶ nepravděpodobně
citlivé

$$\Delta\Phi = \pi \quad \text{pro } \varphi \approx 3^\circ$$

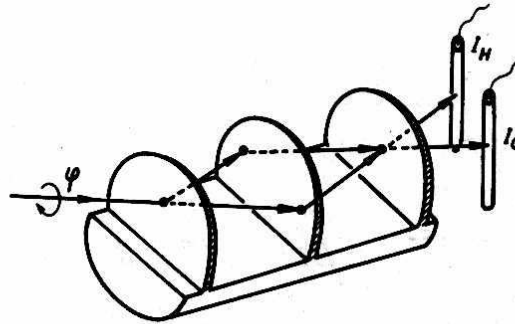
$$H \approx 35 \text{ mm} \times \sin(3^\circ)$$

$$\square 1,83 \text{ mm}$$

COW experiment ... Collela, Overhauser, Werner

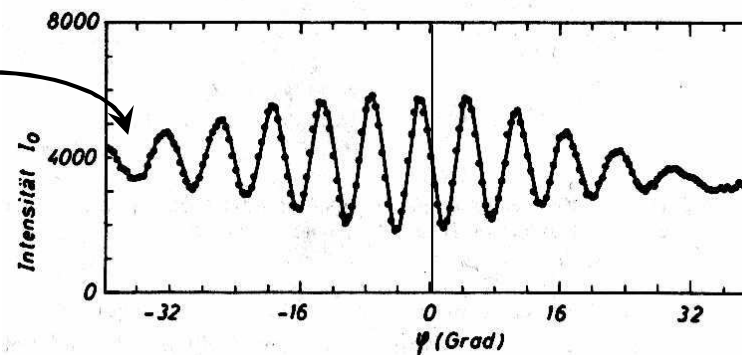
Interferenční gravimetrie: jeden z prvních výsledků

osa natáčení je
vodorovná



② kontrast brzo vymizí:
to neumíme vysvětlit jen
počítáním fázových
posuvů.

Příště úplnější teorie



① nepravděpodobně
citlivé

$$\Delta\Phi = \pi \quad \text{pro } \varphi \approx 3^\circ$$

$$H \approx 35 \text{ mm} \times \sin(3^\circ)$$

$$\square 1,83 \text{ mm}$$

COW experiment ... Collela, Overhauser, Werner

Co s tím dál?

DVĚ MOŽNOSTI

- Věříme na princip ekvivalence. Pak je to velmi přesná gravimetrická metoda gravimetrie ... měření gravit. účinků Země na daném místě

Ize studovat rotaci Země, vliv Coriolisovy síly atd.

Ize sledovat změny grav. pole. např. v Missouri cítí příliv a odliv v Tichém oceánu

- hodláme ověřovat princip ekvivalence v kvantové mechanice

Ehrenfestův teorém $m_i \langle z \rangle'' = -m_g g \langle z \rangle$

.... stejné, jako v klasické fyzice

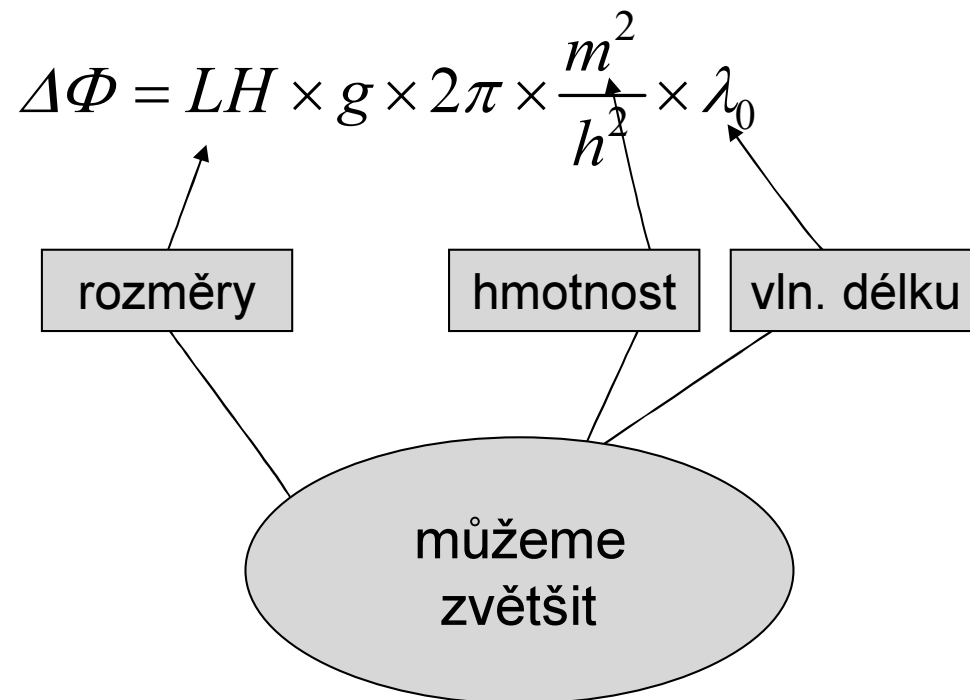
Ve Schrödingerově rovnici jiná kombinace

$$+ \Delta \psi(\mathbf{r}) + \frac{2m_i}{\hbar^2} (E - m_g g z) \psi(\mathbf{r}) = 0, \quad \Psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}$$

vzorec pro fázový rozdíl je nezávisle měřitelná kombinace:

$$LH \times g \times 2\pi \times \frac{m_i m_g}{h^2} \times \lambda_0$$

Zvýšení citlivosti



VELMI STUDENÉ NEUTRONY

skleněné holografické mřížky
dráhy částic v interferometru
okolo 1metru

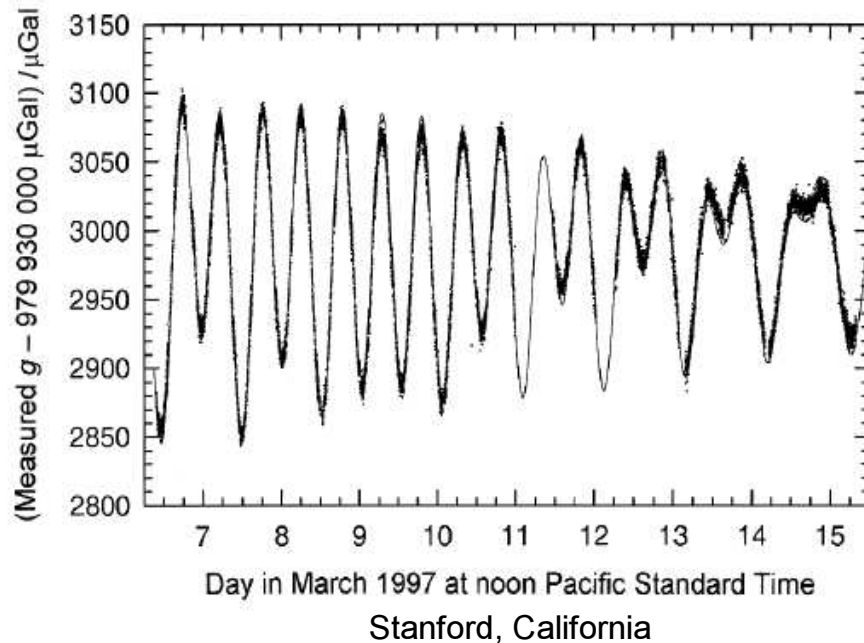
STUDENÉ ATOMY CESIA

mřížky stojatých světelných vln
dráhy částic v interferometru
okolo 1metru

Gravimetrie s cesiovými atomy

$$g \approx 9.8 \text{ ms}^{-2} \leftrightarrow 9.8 \times 10^8 \text{ } \mu\text{Gal}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ ms}^{-2} \approx 10^{-9} \text{ g}$$

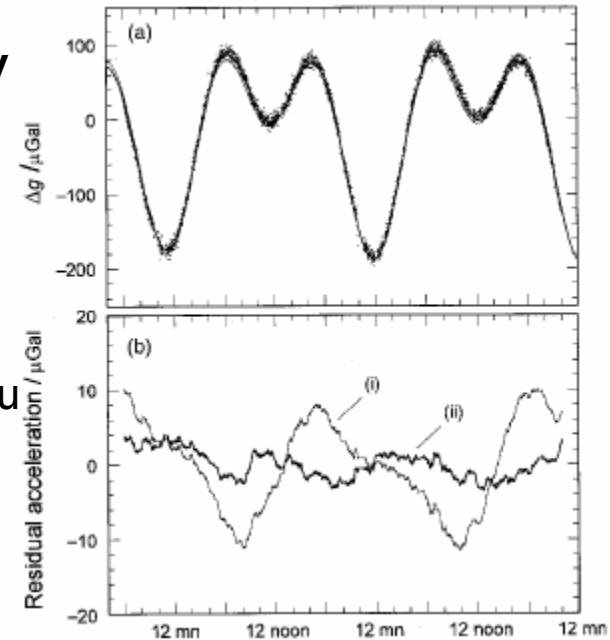


**slapové efekty v
zemské kůře**

teoretický fit

I. bez vlivu oceánu

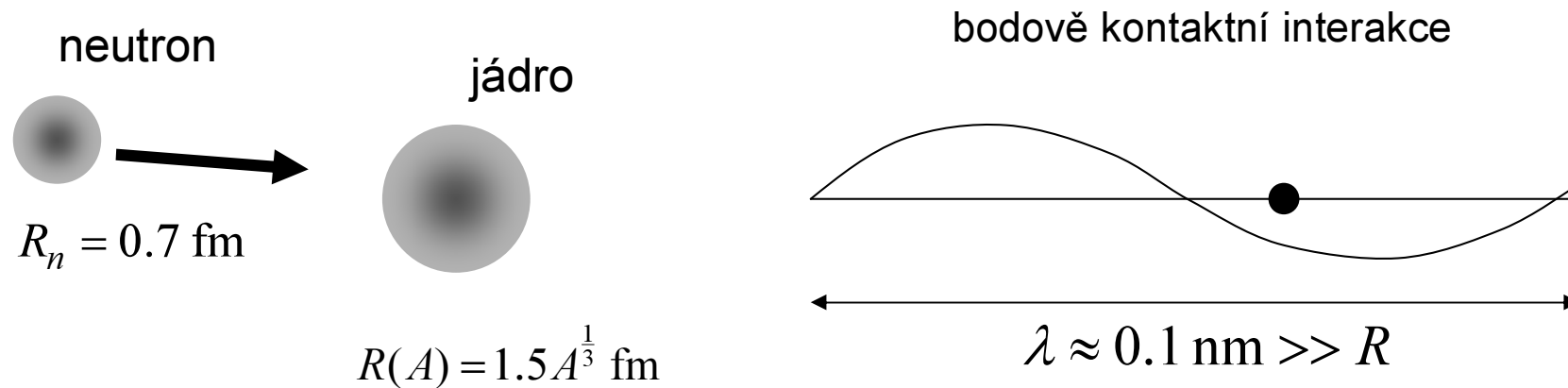
II. se započtením
vlivu oceánského
vzdutí



Object	Mass/kg	Distance/m	Gravity/ μGal	Gradient/ $\mu\text{Gal m}^{-1}$	Angle/degree	Gravity change/ μGal
Earth	6.0×10^{24}	6.4×10^6	9.8×10^8	308	0	9.8×10^8
Optical table	1000	1.5	3.0	4	0	3.0
Aluminium spacers	1	0.1	0.7	13	0	0.7
Experimental physicist (A. P.)	90	1.0	0.7	1.2	45	0.5
Loaded truck	40 000	10	2.7	0.5	45	2.0
Physics lecture hall (demolished)	2.0×10^6	50	5.0	0.2	90	0.0
Hole (excavated)	2.0×10^7	100	13.3	0.3	85	1.3

Šíření neutronů v nemagnetických látkách

Interakce neutronů s hmotou



experiment potvrzuje čistě isotropní rozptyl (stejný ve všech směrech). To je signatura krátkodosahového rozptylového potenciálu

FERMIHO
PSEUDOPOTENCIÁL

$$V(\mathbf{r}) = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot b \cdot \delta(\mathbf{r})$$

rozptylová délka
z experimentu

Konstanty jsou nastaveny tak, že
již v Bornově aproximaci

$$\sigma_{\text{TOT}} = 4\pi b^2$$

Ukázka parametrů

Element	Symbol	σ_γ [barn]	σ_t [barn]	σ_α [barn]	σ_a [barn]	σ_s [barn]	σ_f [barn]	σ_t [barn]	Density [gm/cm ³]
		capture	hydrogen	alpha	absorption	scattering	fission	total	
Actinium	Ac				515				
Aluminum	¹³ Al ²⁷	0.23			0.23	1.49		1.72	2.699
Bismuth	Bi				0.033				9.8
Boron	⁵ B				759	3.6			2.3
	¹⁰ B	0.5	<0.2	3837		2.23			
	¹¹ B	5.5			0.0055	3.9			
Cadmium	¹¹² Cd				2450	5.6			8.65
Silicon	¹⁴ Si	0.16			0.16	2.2		2.4	2.33
	¹⁴ Si ²⁸	0.17							
	¹⁴ Si ²⁹	0.28							
	¹⁴ Si ³⁰	0.107							
	¹⁴ Si ³¹	0.48							

barn [stodola] = 10⁻²⁸ m²

běžné hodnoty
pro
elastický rozptyl

Ukázka parametrů

Element	Symbol	σ_γ [barn] capture	σ_t [barn] hydrogen	σ_α [barn] alpha	σ_a [barn] absorption	σ_s [barn] scattering	σ_f [barn] fission	σ_t [barn] total	Density [gm/cm ³]
Actinium	Ac				515				
Aluminum	¹³ Al ²⁷	0.23			0.23	1.49		1.72	2.699
Bismuth	Bi				0.033				9.8
Boron	⁵ B				759	3.6			2.3
	¹⁰ B	0.5	<0.2	3837		2.23			
	¹¹ B	5.5			0.0055	3.9			
Cadmium	Cd					5.6			8.65
Silicon	¹⁴ Si	0.16			0.16	2.2		2.4	2.33
		0.17							
		0.28							
		107							
		0.48							

bor absorbuje neutrony a emituje α částici; slouží k detekci neutronů

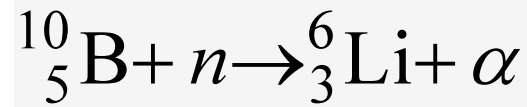
kadmium absorbuje neutrony a slouží k řízení reaktoru

barn [stodola] = 10^{-28} m²

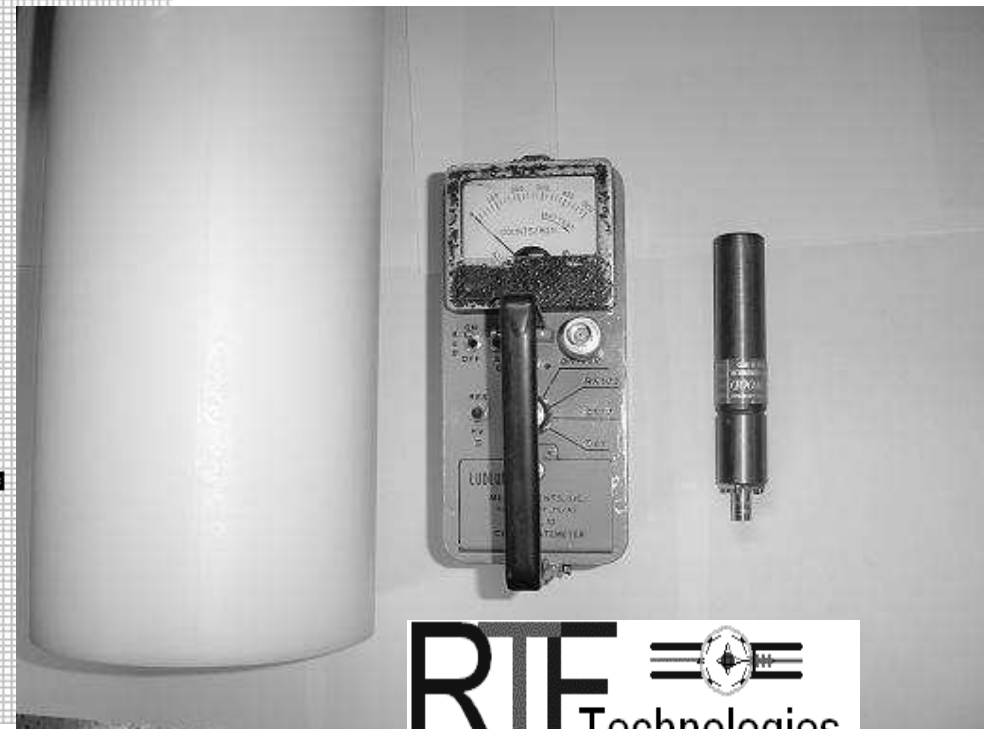
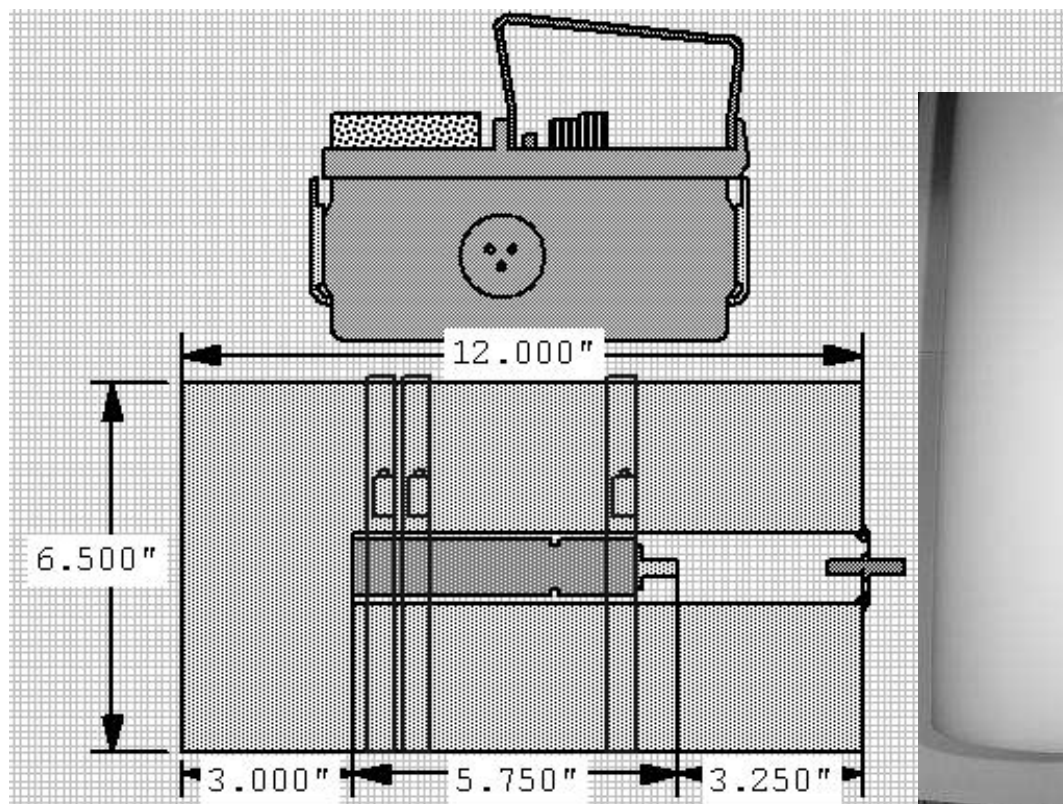
běžné hodnoty pro elastický rozptyl

BF_3 detektor neutronů

reakce



náboj $2e$
normální detekce



Optický potenciál neutronů v PL

celková potenciální energie ve vzorku \rightarrow efektivní konstantní pot. energie

$$V(\mathbf{r}) = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \sum b_i \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \rightarrow V_{\text{OPT}} = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \bar{b} \cdot N$$

hustota
atomů

**Dlouhovlnné neutrony vnímají prostorovou střední hodnotu
potenciální energie**

polohy
jednotlivých
atomů

Optický potenciál neutronů v PL

celková potenciální energie ve vzorku \rightarrow efektivní konstantní pot. energie

$$V(\mathbf{r}) = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \sum b_i \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \rightarrow V_{\text{OPT}} = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \bar{b} \cdot N$$

Dlouhovlnné neutrony vnímají prostorovou střední hodnotu potenciální energie

index lomu

$$n(\mathbf{r}) \approx 1 - V_{\text{OPT}}(\mathbf{r}) / 2E$$

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} k_0^2 = \frac{h^2}{2m} \cdot \frac{1}{\lambda_0^2}$$

$$n(\mathbf{r}) \approx 1 - \lambda_0^2 \times \bar{b} \cdot N / 2\pi$$

Interferenčním měřením indexu lomu najdeme rozptylovou délku b !!!

Optický potenciál neutronů v PL

celková potenciální energie ve vzorku \rightarrow efektivní konstantní pot. energie

$$V(\mathbf{r}) = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \sum b_i \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \rightarrow V_{\text{OPT}} = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \bar{b} \cdot N$$

Dlouhovlnné neutrony vnímají prostorovou střední hodnotu potenciální energie

index lomu

$$n(\mathbf{r}) \approx 1 - V_{\text{OPT}}(\mathbf{r}) / 2E$$

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} k_0^2 = \frac{h^2}{2m} \cdot \frac{1}{\lambda_0^2}$$

makroskopickým

$$n(\mathbf{r}) \approx 1 - \lambda_0^2 \times \bar{b} \cdot N / 2\pi$$

mikroskopickou

Interferenčním měřením indexu lomu najdeme rozptylovou délku b !!!

Optický potenciál neutronů v PL

celková potenciální energie ve vzorku \rightarrow efektivní konstantní pot. energie

$$V(\mathbf{r}) = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \sum b_i \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \rightarrow V_{\text{OPT}} = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \bar{b} \cdot N$$

Dlouhovlnné neutrony vnímají prostorovou střední hodnotu potenciální energie

index lomu

$$n(\mathbf{r}) \approx 1 - V_{\text{OPT}}(\mathbf{r}) / 2E$$

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} k_0^2 = \frac{h^2}{2m} \cdot \frac{1}{\lambda_0^2}$$

makroskopickým

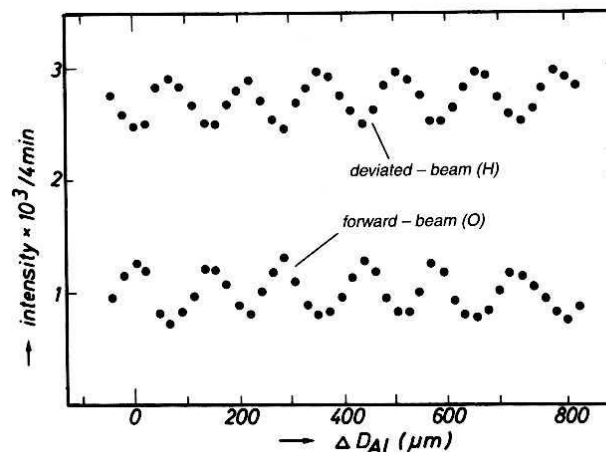
$$n(\mathbf{r}) \approx 1 - \lambda_0^2 \times \bar{b} \cdot N / 2\pi$$

mikroskopickou

Interferenčním měřením indexu lomu najdeme rozptylovou délku b !!!

PRVNÍ MĚŘENÍ TOHOTO TYPU

Zasouváním klínu z hliníku narůstá dráhový rozdíl



Optický potenciál neutronů v PL

celková potenciální energie ve vzorku \rightarrow efektivní konstantní pot. energie

$$V(\mathbf{r}) = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \sum b_i \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \rightarrow V_{\text{OPT}} = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \cdot \bar{b} \cdot N$$

Dlouhovlnné neutrony vnímají prostorovou střední hodnotu potenciální energie

index lomu

$$n(\mathbf{r}) \approx 1 - V_{\text{OPT}}(\mathbf{r}) / 2E$$

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} k_0^2 = \frac{h^2}{2m} \cdot \frac{1}{\lambda_0^2}$$

makroskopickým

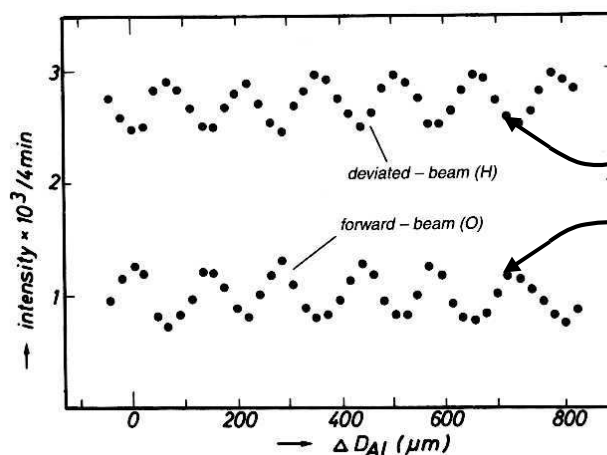
$$n(\mathbf{r}) \approx 1 - \lambda_0^2 \times \bar{b} \cdot N / 2\pi$$

mikroskopickou

Interferenčním měřením indexu lomu najdeme rozptylovou délku b !!!

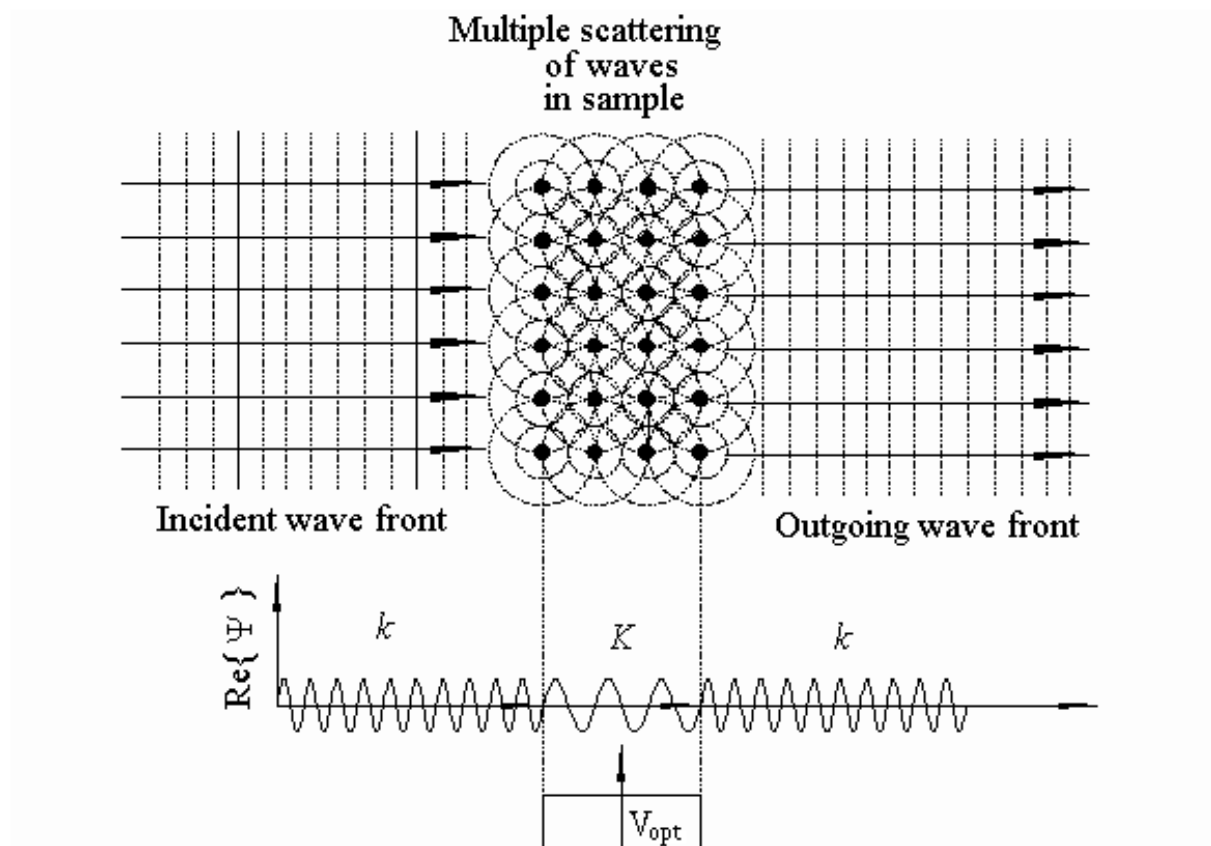
PRVNÍ MĚŘENÍ TOHOTO TYPU

Zasouváním klínu z hliníku narůstá dráhový rozdíl



$$I_{\text{TOT}} = I_{\text{O}} + I_{\text{H}} = \text{const.}$$

Ke vzniku optického potenciálu



Ukázka skutečných hodnot

o.k.

2.2 Neutron optics

7

Material	N (nm^{-3})	\bar{b} (fm)	V_{op} (10^{-7}eV)	$(1 - n)$ $\times 10^{-2}$
Ni	91.3	10.3	2.449	1.49
SiO ₂ (quartz-glass)	22.0	15.75	0.902	0.55
Ti	56.7	-3.438	-0.508	-0.310
V	72.2	-0.3824	-0.072	-0.044
Al	60.3	3.449	0.541	0.330

Table 2.2.: Neutron optical data for selected materials calculated for $\lambda = 10$ nm. Source: Koester et al. (1991).

Ukázka skutečných hodnot

o.k.

2.2 Neutron optics

7

Material	N (nm^{-3})	\bar{b} (fm)	V_{op} (10^{-7}eV)	$(1 - n)$ $\times 10^{-2}$
Ni	91.3	10.3	2.449	1.49
SiO ₂ (quartz-glass)	22.0	15.75	0.902	0.55
Ti	56.7	-3.438	-0.508	-0.310
V	72.2	-0.3824	-0.072	-0.044
Al	60.3	3.449	0.541	0.330

Table 2.2.: Neutron optical data for selected materials calculated for $\lambda = 10 \text{ nm}$. Source: Koester et al. (1991).

UKÁZKA VÝPOČTU PRO HLINÍK

hustota $\rho = 2699 \text{ kg/m}^3$ relativní atomová hmotnost $A = 27$

$$N = 1000 N_A \times \frac{\rho}{A} \approx 1000 \times 6.02 \times 10^{23} \times 2699 / 27 = 6.02 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} = 60.2 \text{ fm}^{-3} \quad \text{o.k.}$$

$$V_{\text{OPT}} = \frac{2 \times 3.14 \dots \times (1.055 \times 10^{-34})^2}{1.66 \times 10^{-27} \times 1.00866} \cdot 3.449 \times 10^{-15} \times 6.02 \times 10^{28} / 1.602 \times 10^{-19} = 5.41 \times 10^{-8} \text{ eV} \quad \text{o.k.}$$

$$1 - n = (10 \times 10^{-9})^2 \times 3.449 \times 10^{-15} \times 6.02 \times 10^{28} / 2 / 3.14 \dots = 3.30 \times 10^{-3} \quad \text{o.k.}$$

**Vyloučení justičních
(geometrických) chyb**

- přesouvání vzorku mezi oběma cestami
- natáčení po krocích ve sklonu a v azimutu

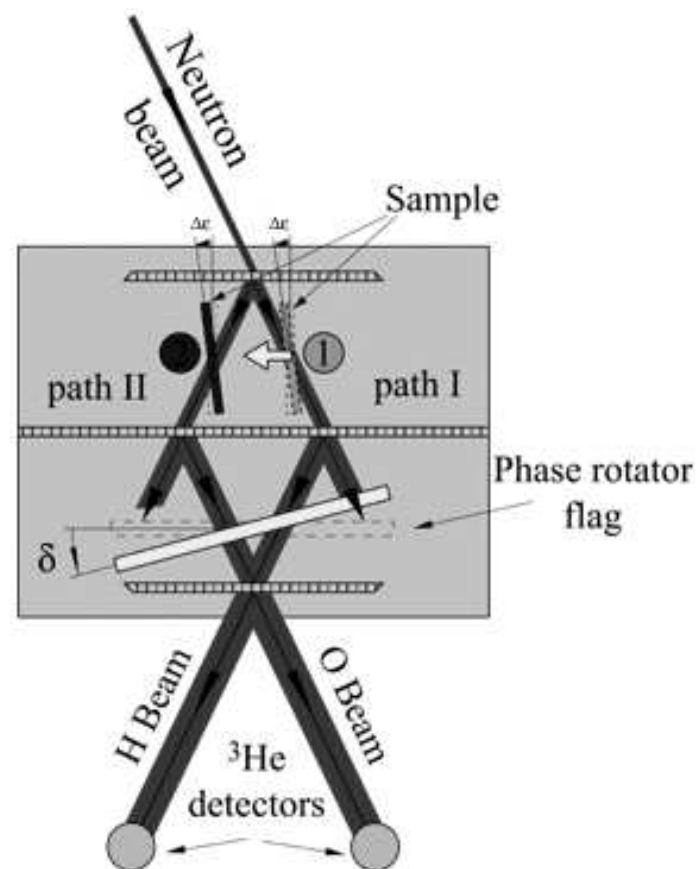
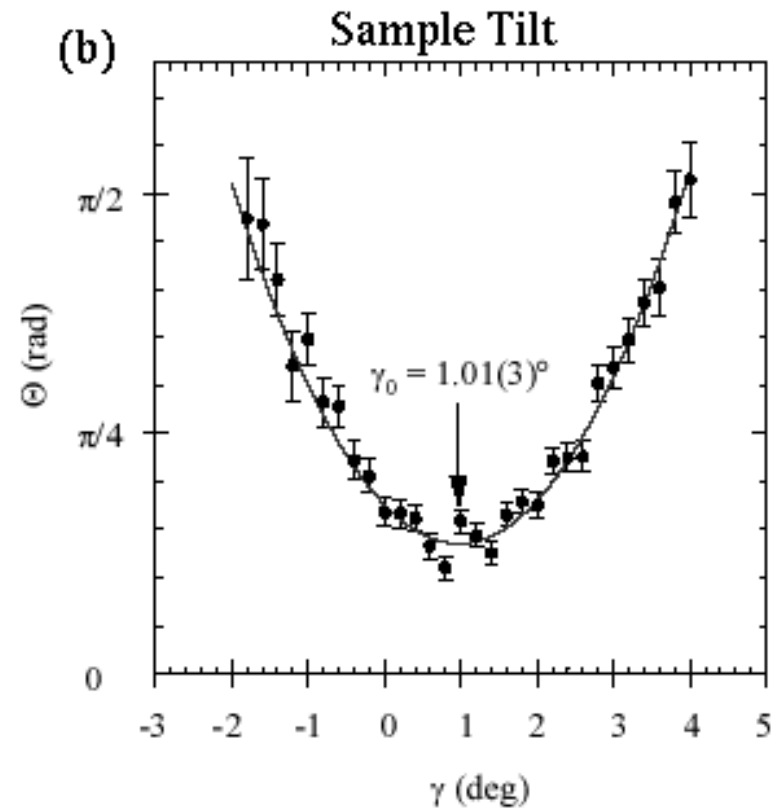
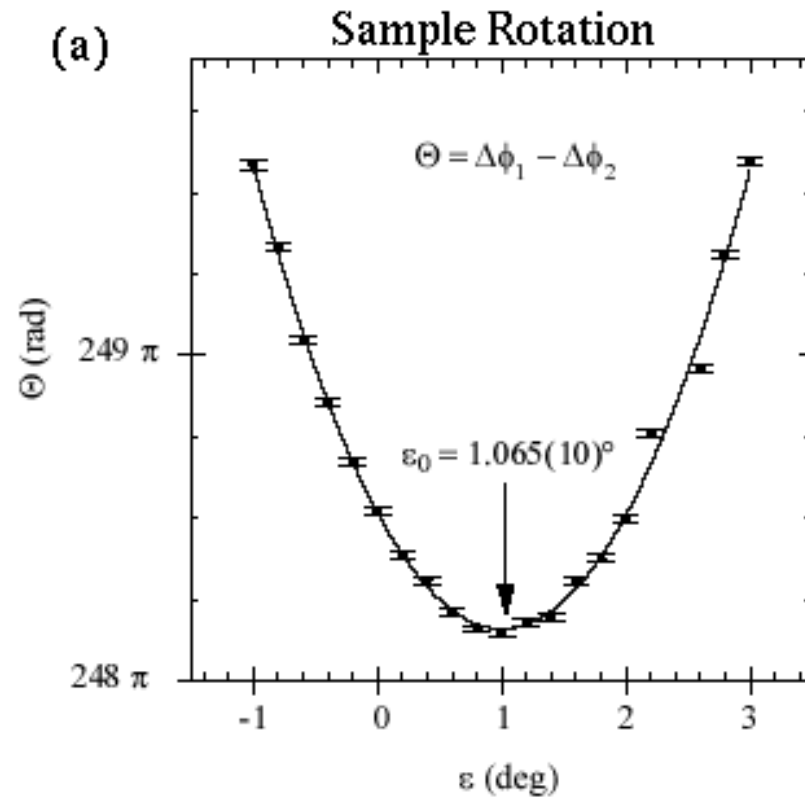


Fig. 1. Topview of neutron interferometer experimental setup to measure scattering

Vyloučení geometrických chyb



Moderní přesné měření (NIST)

Moderní přesné měření

v NIST

údaje pro křemík

$$b_{\text{new}} = 4.1507(2) \text{ fm}$$

$$b_{\text{accepted}} = 4.1490(10) \text{ fm}$$

Uncertainty level is at 0.005%,
an improvement of a factor of 5
over previous best measurement
[C.G. Shull and J.A. Oberteuffer,
Phys. Rev. Lett. **29**, 867 (1972);
also C.G. Shull,
Phys. Rev. Lett. **21**, 1585 (1968)].

Sources of uncertainty:

1. Variations in the thickness D
amounting to 0.005 %.
2. Statistical 0.001 %.
3. Alignment 0.0002 %.
4. Density 0.0001 %.

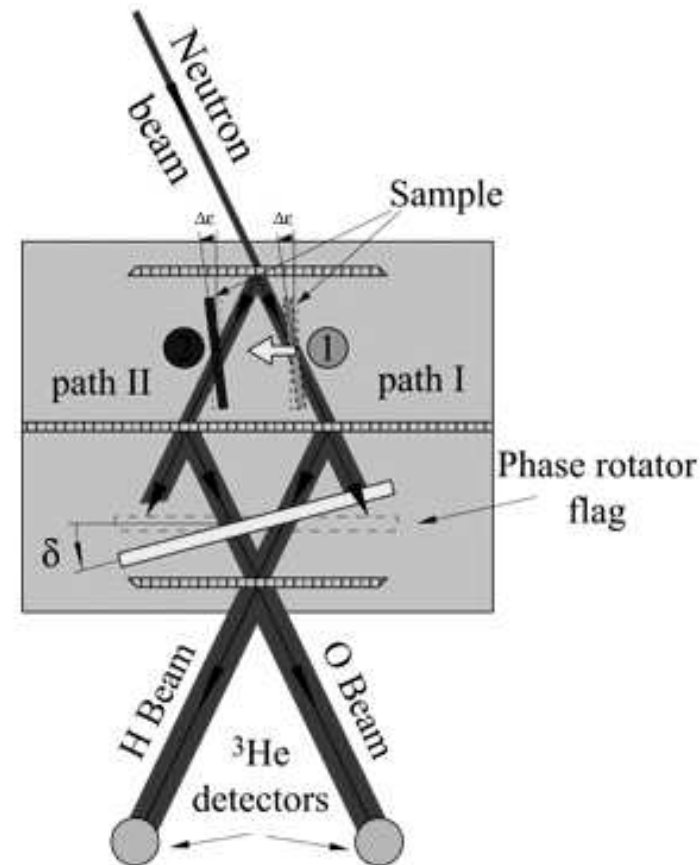


Fig. 1. Topview of neutron interferometer experimental setup to measure scattering

The end

Pro srovnání: zvukové vlny ve vzduchu