

F4110
Fyzika atomárních soustav
letní semestr 2005 - 2006

VI.
Difrakce atomů a molekul

KOTLÁŘSKÁ 23. BŘEZNA 2006

Úvodem

- Thema: de Broglieho hypotéza platí i pro masivní komplexní částice
- Molekulové paprsky. Éra Otto Sterna
- Další rozvoj až do současnosti
- Nejnovější kapitola: od difrakce fullerenu směrem k makroskopickým objektům. Éra Antona Zeilingera
- První setkání se strašidlem dekoherence

Molekulové svazky (paprsky)

Termální molekulové svazky

Začátky přímé ověření Maxwellova rozdělení ... definitivní nahlédnutí „dovnitř“ kinetické teorie plynů

1911 Dunoyer

1919 - Otto Stern (1888 – 1969) NP 1943



Termální molekulové svazky

Začátky přímé ověření Maxwellova rozdělení ... definitivní nahlédnutí „dovnitř“ kinetické teorie plynů

1911 Dunoyer

1919 - Otto Stern (1888 – 1969) NP 1943

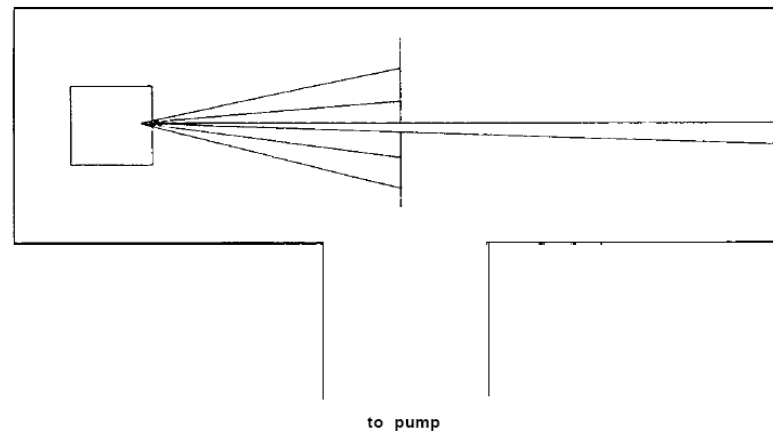


Fig. 1. Arrangement for producing molecular rays.

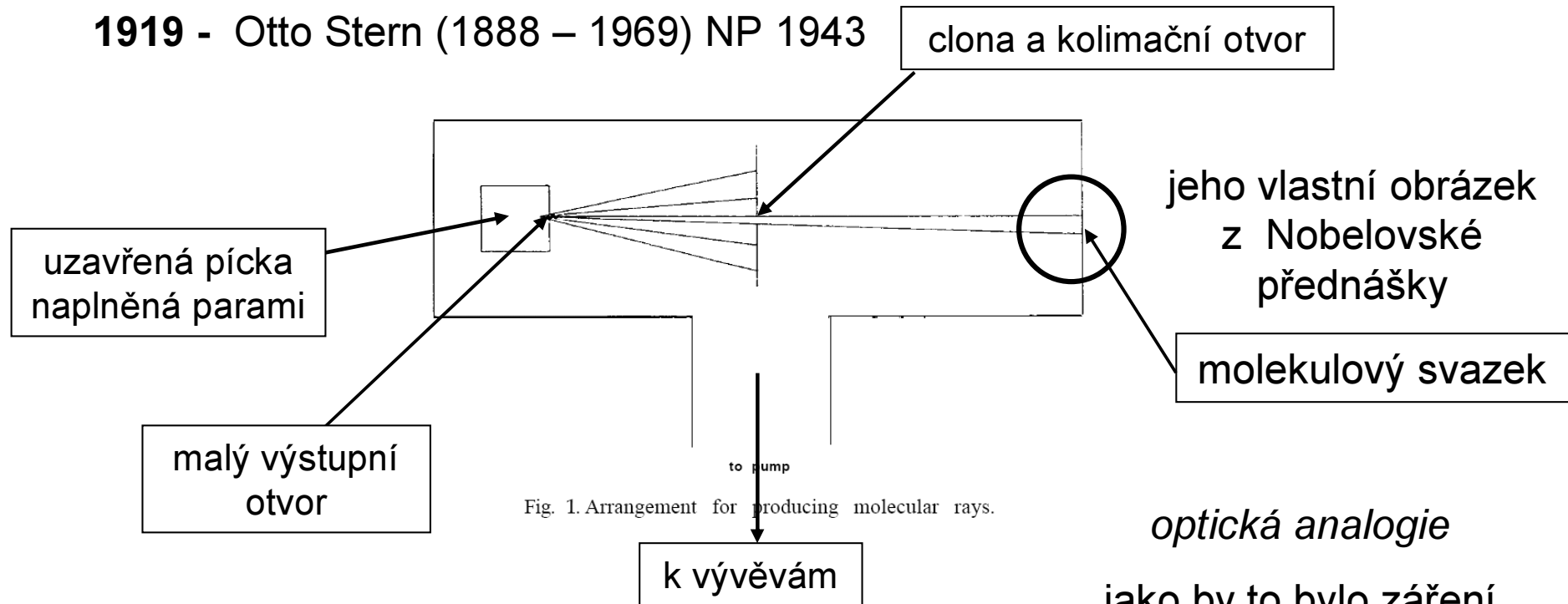
jeho vlastní obrázek
z Nobelovské
přednášky

Termální molekulové svazky

Začátky přímé ověření Maxwellova rozdělení ... definitivní nahlédnutí „dovnitř“ kinetické teorie plynů

1911 Dunoyer

1919 - Otto Stern (1888 – 1969) NP 1943



jeho vlastní obrázek z Nobelovské přednášky

optická analogie
jako by to bylo záření černého tělesa

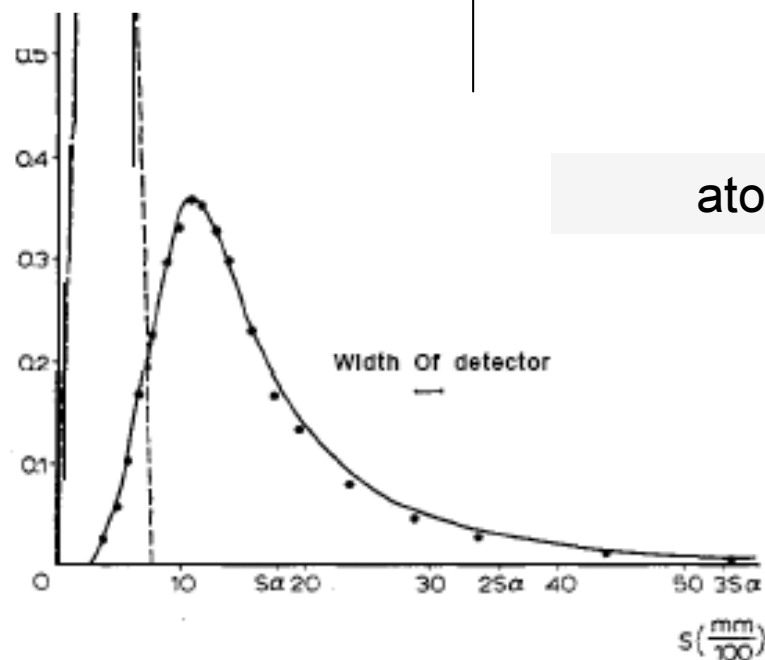
Maxwellovo rozdělení

Možnosti

- Fizeauova metoda ozubeného kola ... *další optická analogie*
- volný pád v gravitačním poli

$$x = vt$$

$$y(v) = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v}\right)^2$$



atomy Cs

de Broglieho vlny

de Broglieho hypotéza pro atomy a molekuly

- 1924** de Broglieho teorie
- 1926 – 1927** de Broglieho teorie potvrzena pro pomalé (*Davisson&Germer*) a rychlé (*G.P. Thomson*) elektrony
- 1926 – 1931** de Broglieho teorie ověřena pro lehké atomy a molekuly (*Stern a spol.*)

Předmět bádání

Základní otázka: jsou vlnové vlastnosti specifické pro fotony a elektrony, nebo jde o universální vlastnost hmoty

Těžkost praktická: masivní částice mají velmi malé vlnové délky

Těžkost principiální: nejsou to hmotné bodové objekty, ale komplexní systémy s bohatou vnitřní strukturou i dynamikou

de Broglieho vlnová délka pro atomy a molekuly

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$$

Tepelné energie jsou malé platí NR vzorce

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE_{\text{kin}}}} \quad m = Au$$

V tepelné rovnováze

... rel. at. (mol.) hmotnost

$$\langle E_{\text{kin}} \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

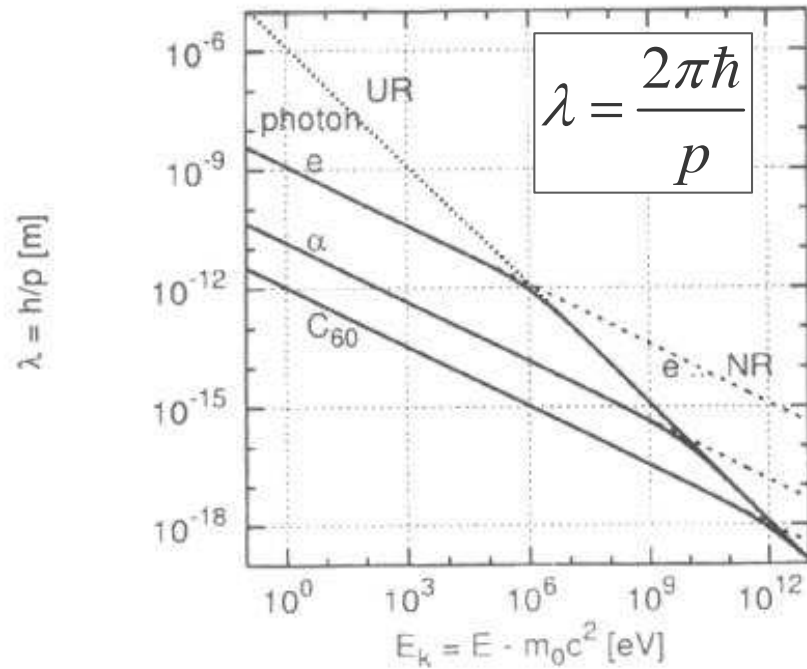
tepelná vlnová
délka

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{3u k_B}} \cdot \frac{1}{\sqrt{AT}} = 2,5 \times 10^{-9} \cdot \frac{1}{\sqrt{AT}}$$

Dva užitečné vzorce

$$E_{\text{kin}} = \frac{3}{2} T / 11600 \quad \text{eV K} \quad \bar{v} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = 158 \sqrt{\frac{T}{A}}$$

Relativistická kinematika a vlnové délky částic

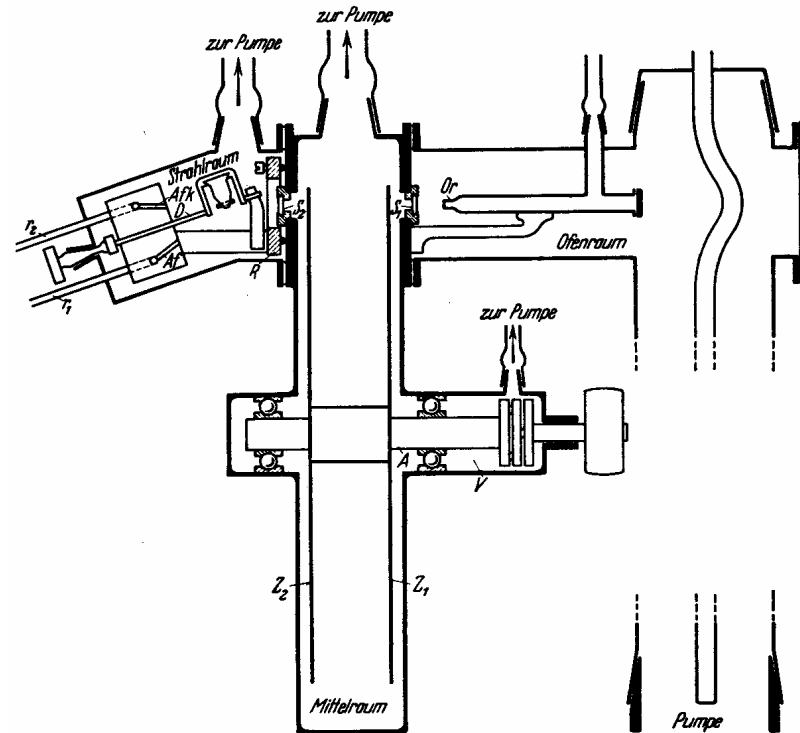


$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{3u k_B}} \cdot \frac{1}{\sqrt{AT}} = 2,5 \times 10^{-9} \cdot \frac{1}{\sqrt{AT}}$$

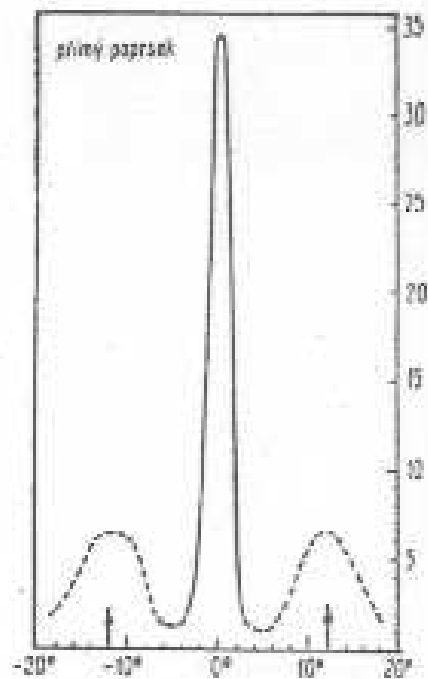
tepelná vlnová
délka

Sternovy pokusy

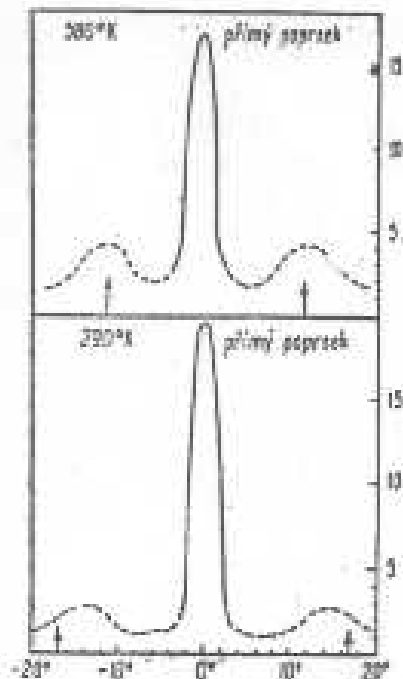
Výsledná aparatura Estermann a Stern 1931



Slavné obrázky

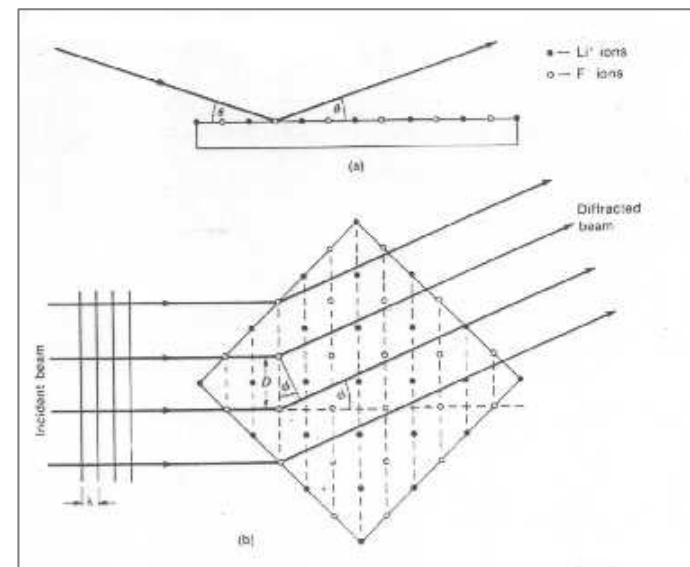


Obř. 195. Difrakce atomů helia na krystalu fluoridu lithia.



Obř. 196. Difrakce molekul vodíka na krystalu fluoridu lithia.

difrakce He H_2
na štěpné ploše LiF

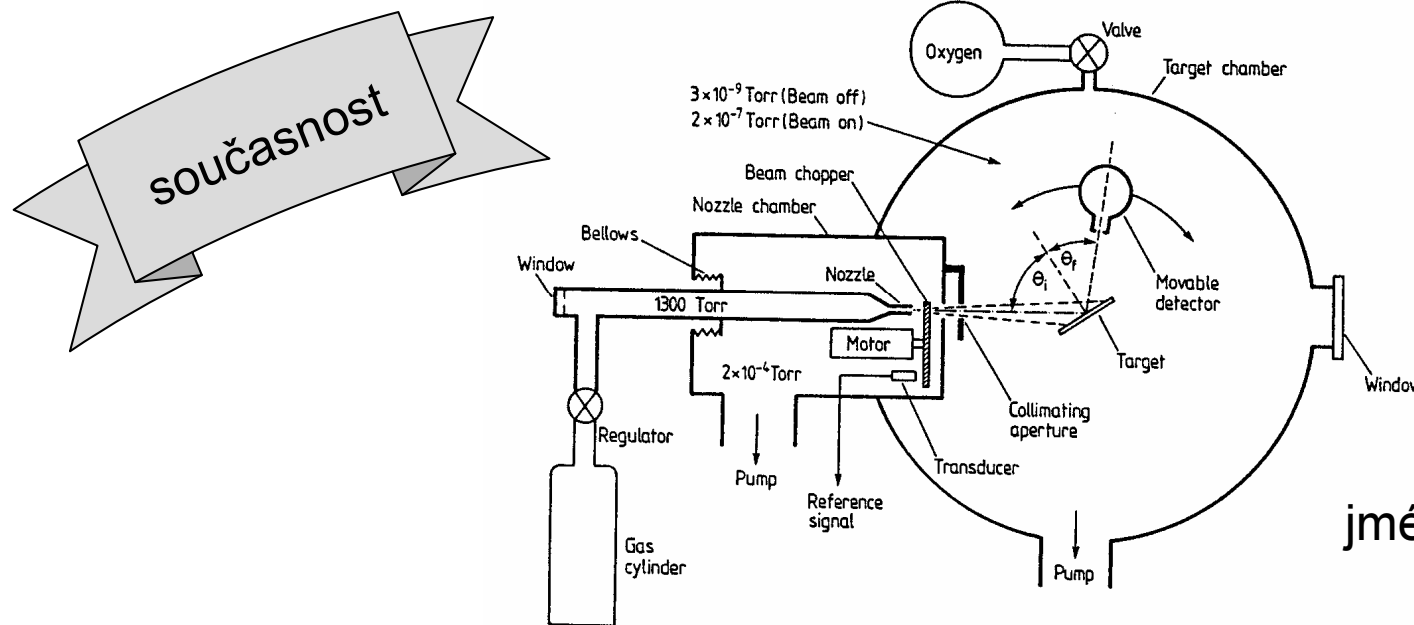


- polární krystal důležitý: interakce neutrálních částic prostřednictvím vdW sil dá jen slabé difrakce
- Braggova reflexe se změnou azimutu!

moderní aplikace

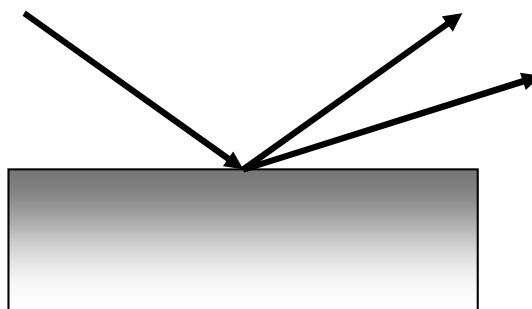
Difrakce atomů He (Ne) – standardní metoda studia povrchů

- volí se velmi pomalé atomy, aby vln. délka byla kolem 1Å (... 25 meV)
- metoda je zcela nedestruktivní (slabá interakce neutrální částice)
- je extrémně „povrchová“ na rozdíl od elektronů, které proniknou několika atom vrstvami. Atomy se jen povrchu dotýkají
- rozdělení rychlostí je netermální (supersonický jet z bomby)



jméno k zapamatování:
J.P. Toennies

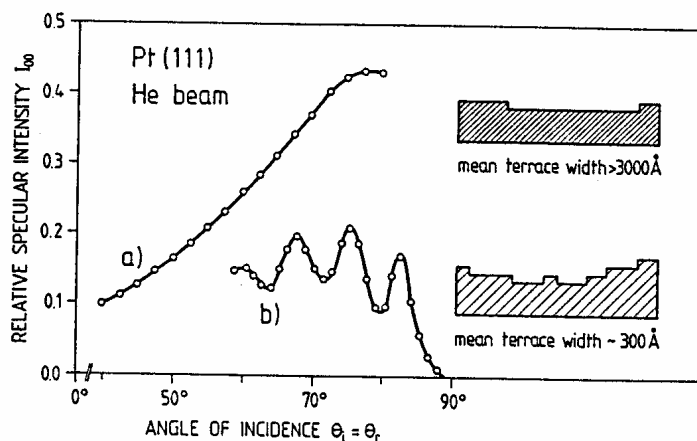
Dva příklady rozptylu atomů He na površích



spekulární odraz
Braggovy reflexe
(nepružné reflexe
záchyt atomů na
povrchu)

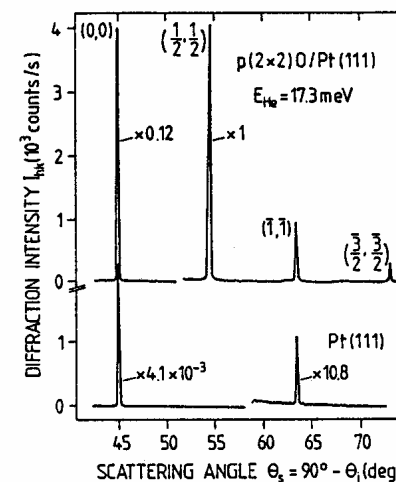
SPEKULÁRNÍ ODRAZ

citlivý na terasovou
strukturu povrchu



BRAGGOVY REFLEXE

obzvláště citlivé na adsorbáty
vyčnívající nad povrch
(zde kyslík)



22.5.2006

difrakce atomů na světle

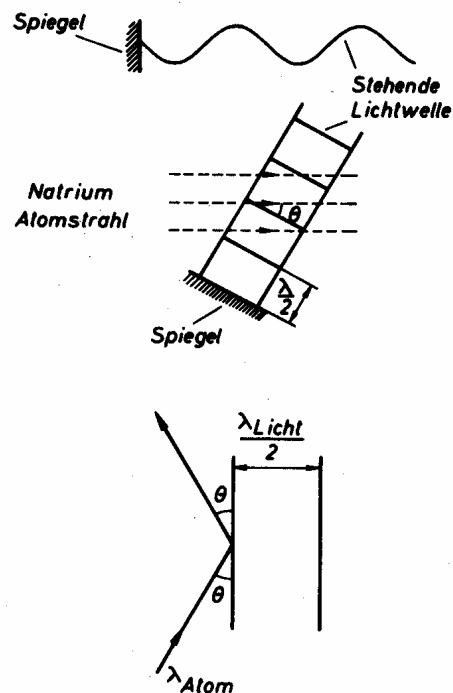
Difrakce na umělých strukturách

Umělé periodické struktury

vyrobené difrakční mřížky

„mřížky“ stojatých světelných vln předvedu dnes už klasický pokus

^{22}Na
→
 $v \approx 1000 \text{ m/s}$
 $\lambda \approx 0.02 \text{ nm}$



laser

$$\lambda_L = 0.589 \mu\text{m}$$

interakce světlo-atom

dva kroky:

pole indukuje elektrický moment

ten interaguje s polem \Rightarrow

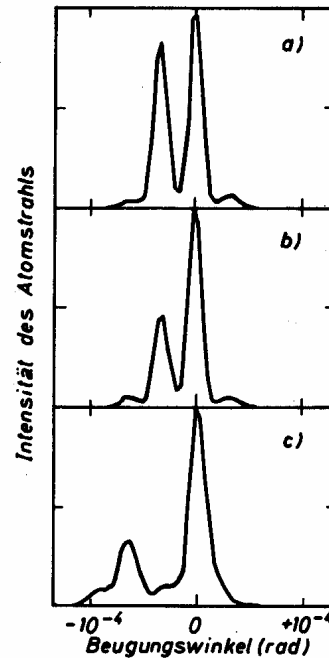
kvadratický efekt \Rightarrow

perioda mřížky

$$\lambda_L / 2 = 0.295 \mu\text{m}$$

Difrakce atomů na stojaté světelné vlně

grazing
incidence



difrakce 1.řádu
závisí na intenzitě laseru

difrakce 2.řádu

difrakční úhly řádu 0.1 mrad

difrakce velkých molekul

Zeifingerovy pokusy

A. Zeilinger ve Vídni je jedním z hlavních odborníků na základy kvantové fyziky.

Věnuje se mimo jiné vlnovým vlastnostem velkých molekul

ZAČÁTEK

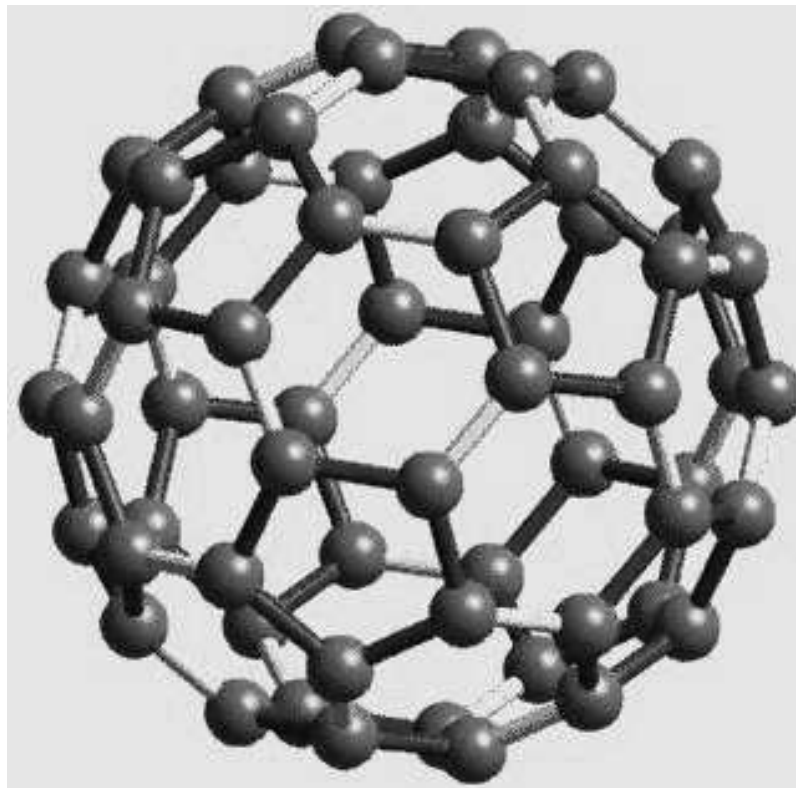
difrakce molekul C_{60} ($A = 720$)
na mřížce
(Nature 1999)



Fulleren

1985 ... Curl, Smalley, Kroto

1996 N.c. za chemii



60 uhlíků

12 pětiúhelníků

20 šestiúhelníků

$$A=60 \times 12 = 720$$

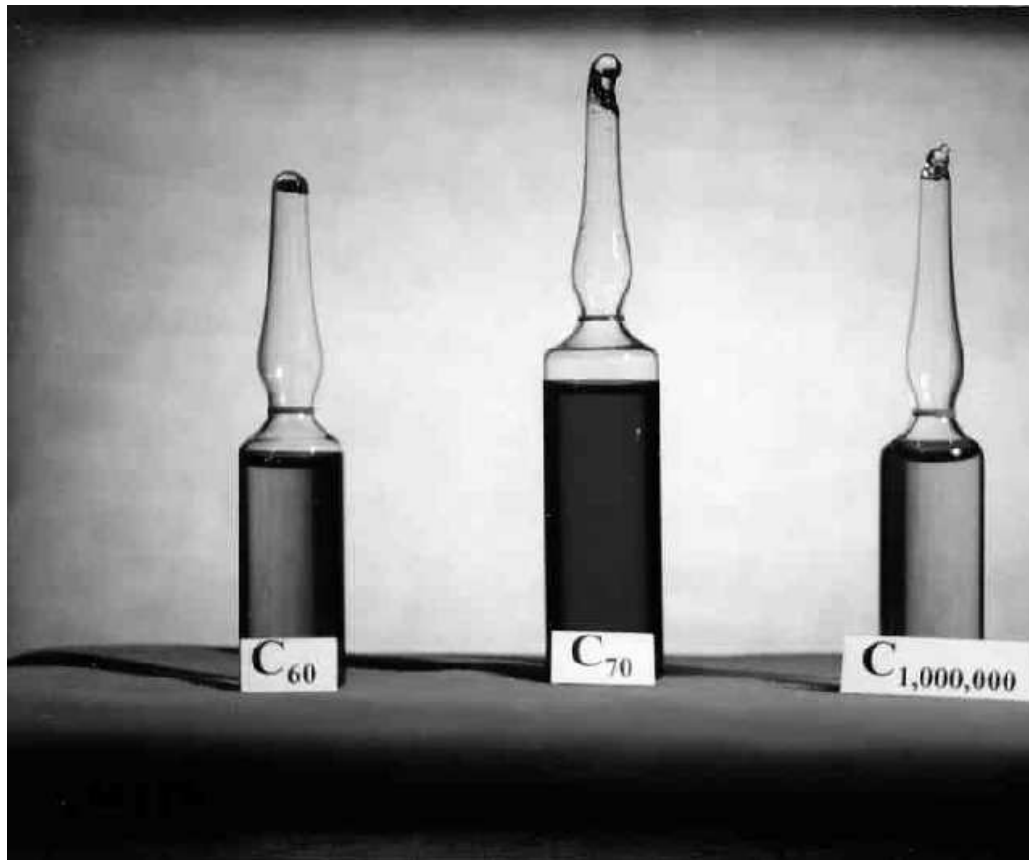
R. Buckminster Fuller

Richard Buckminster Fuller (1895 - 1993)
americký architekt

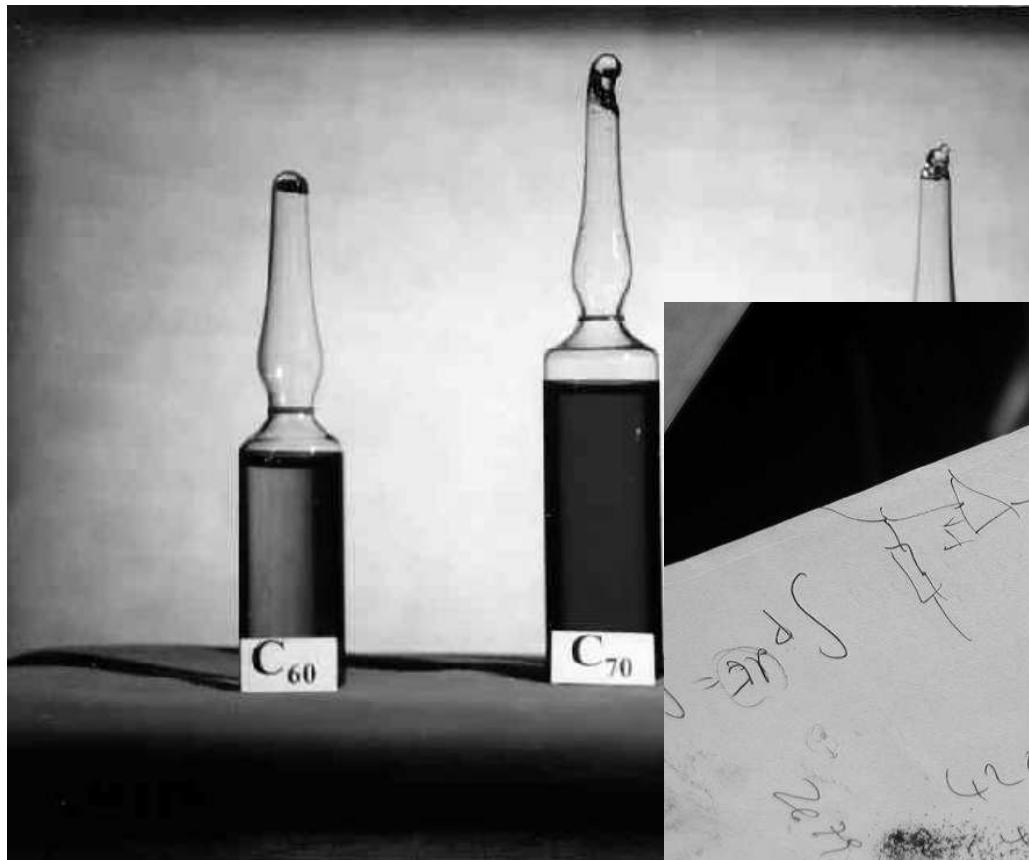


pavilon USA na EXPO '67 Montreal

Jak vypadá

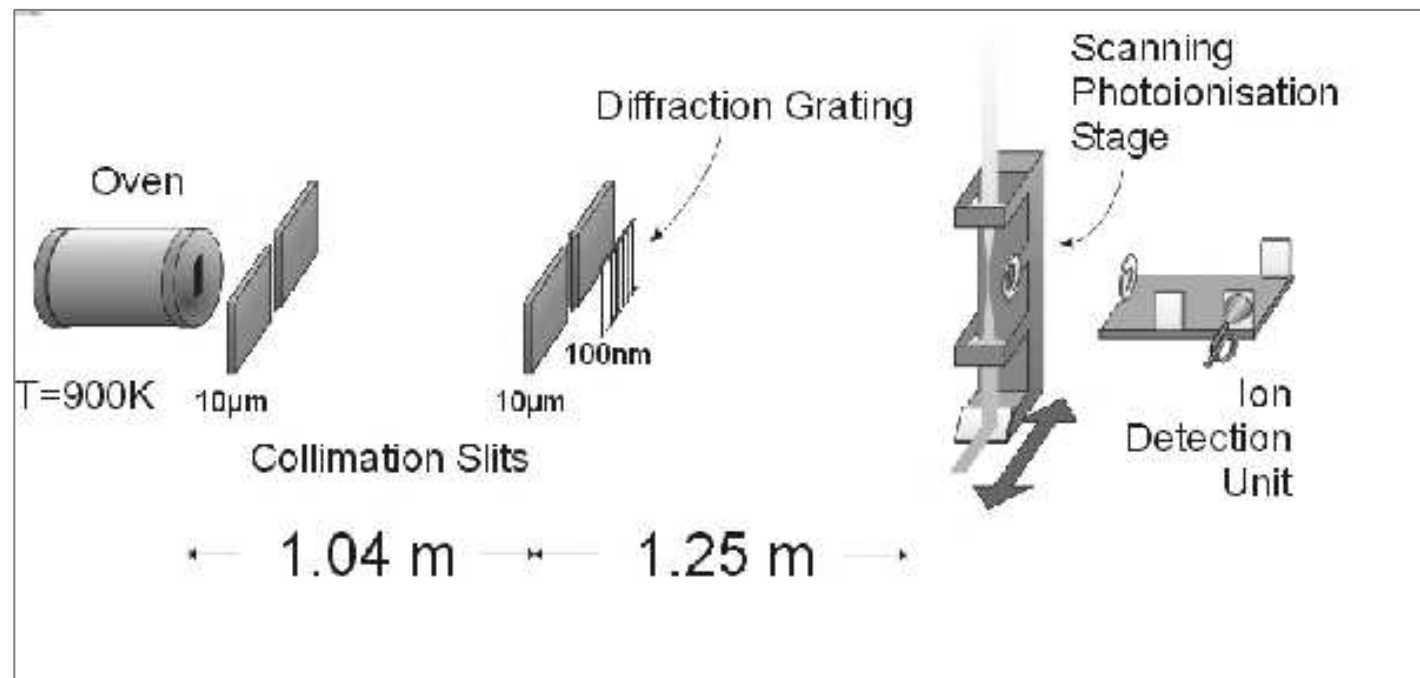


Jak vypadá

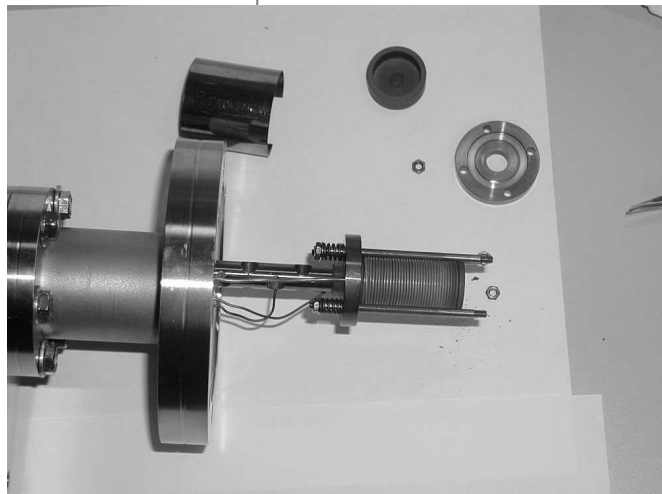
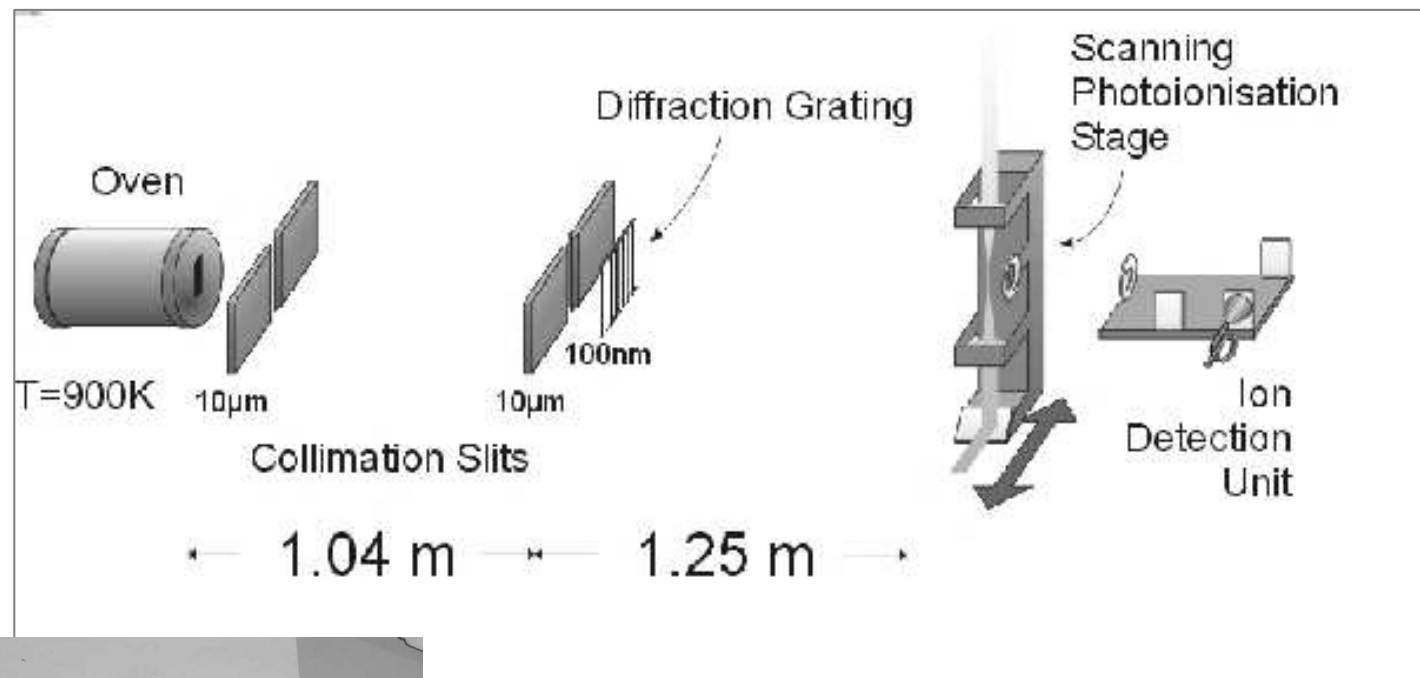


difrakce velkých molekul na mřížce

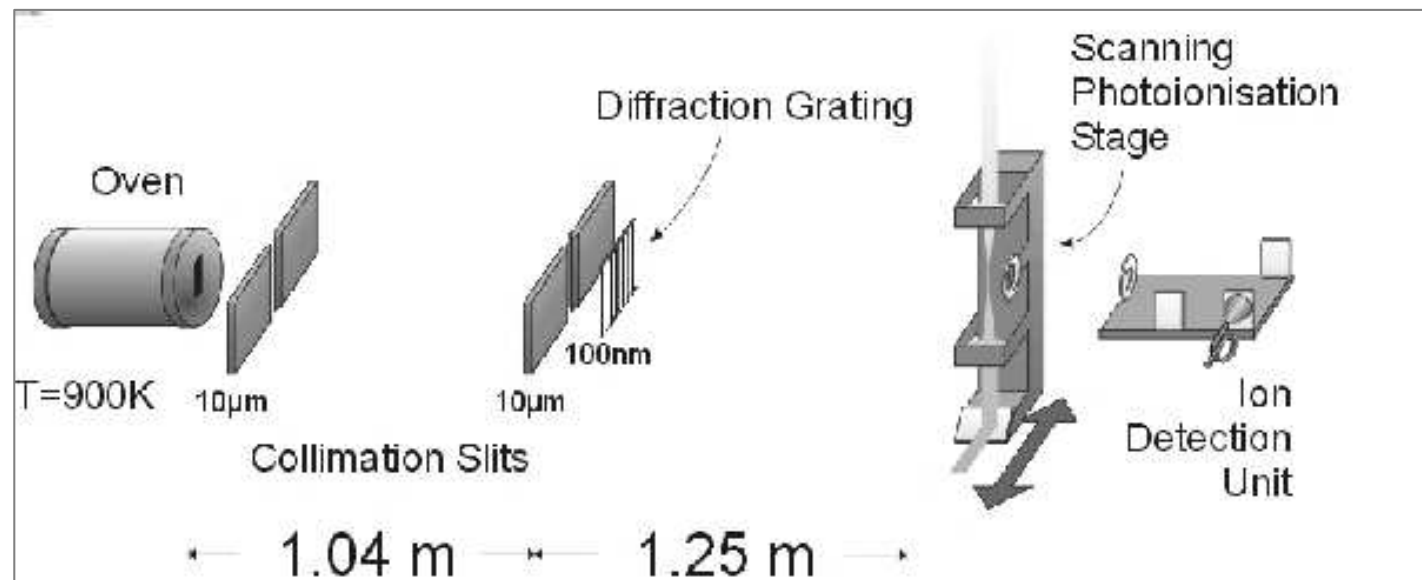
Experiment



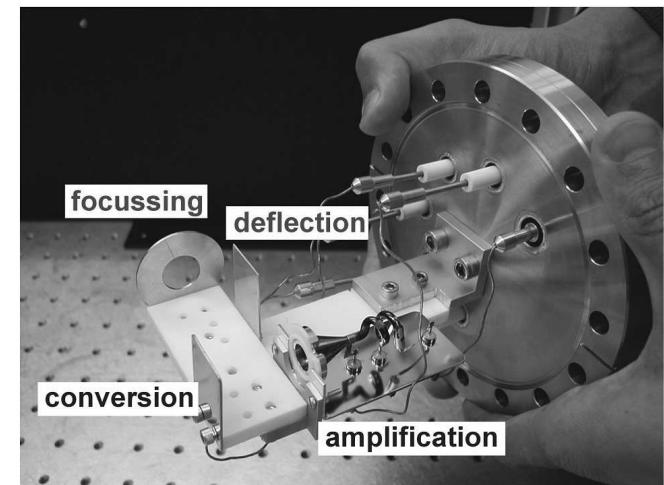
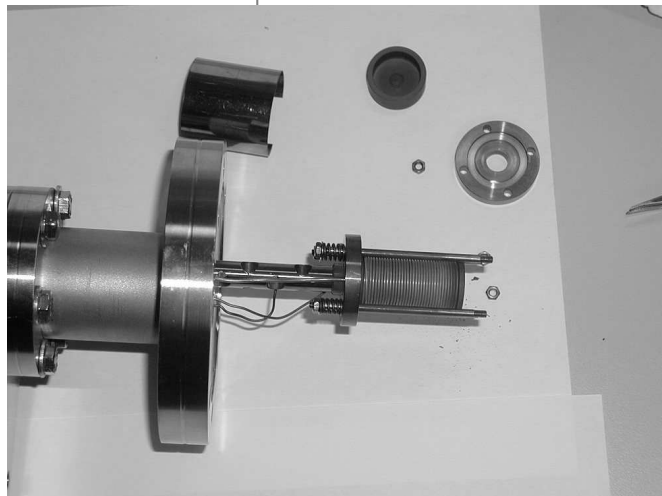
Experiment



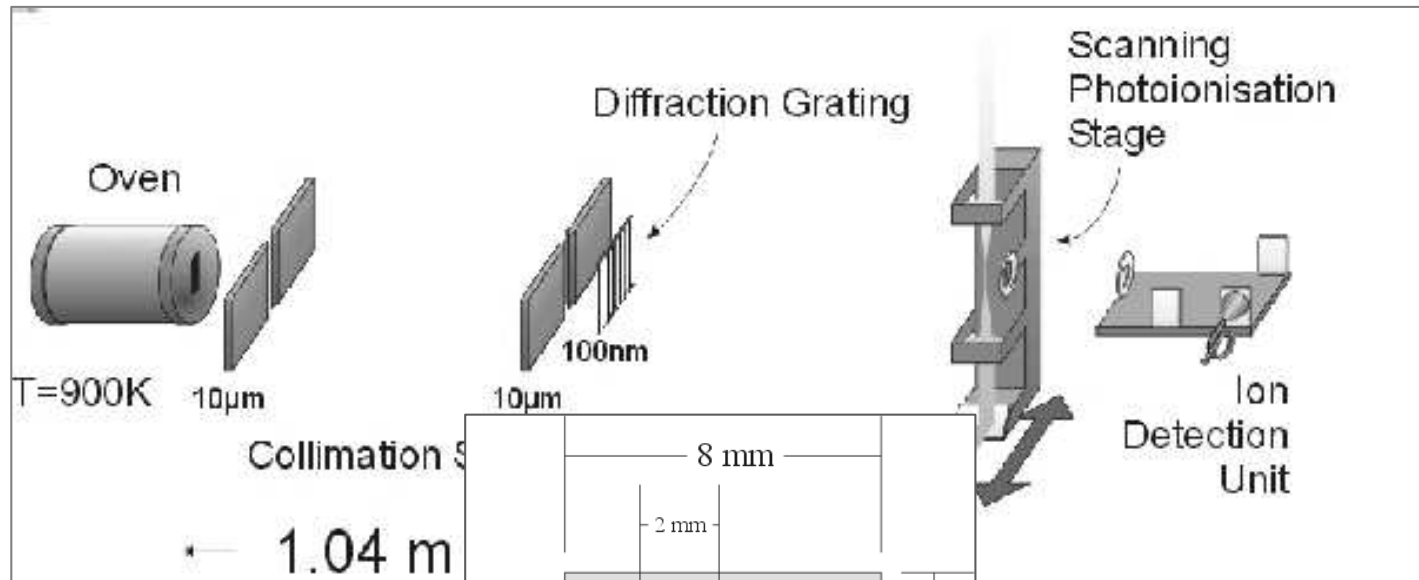
Experiment



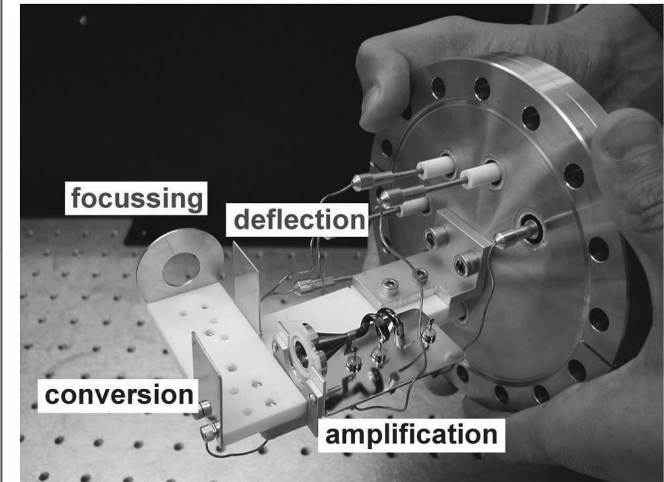
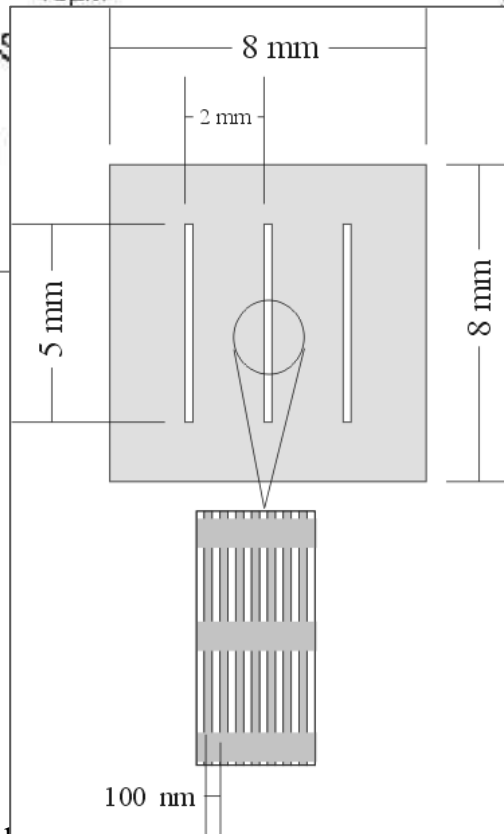
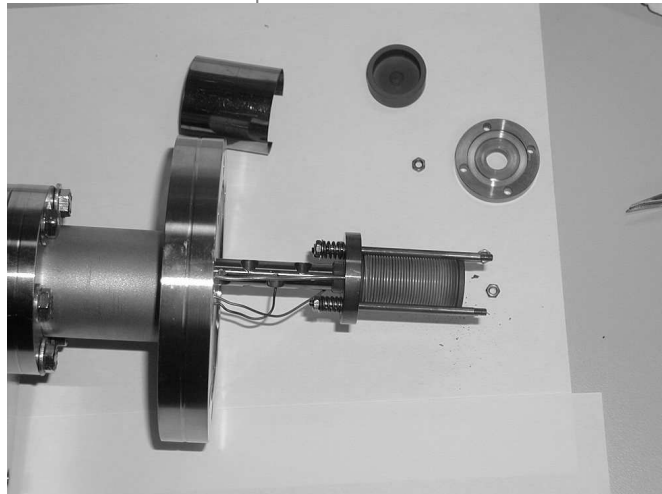
Post-acceleration and detection of ions



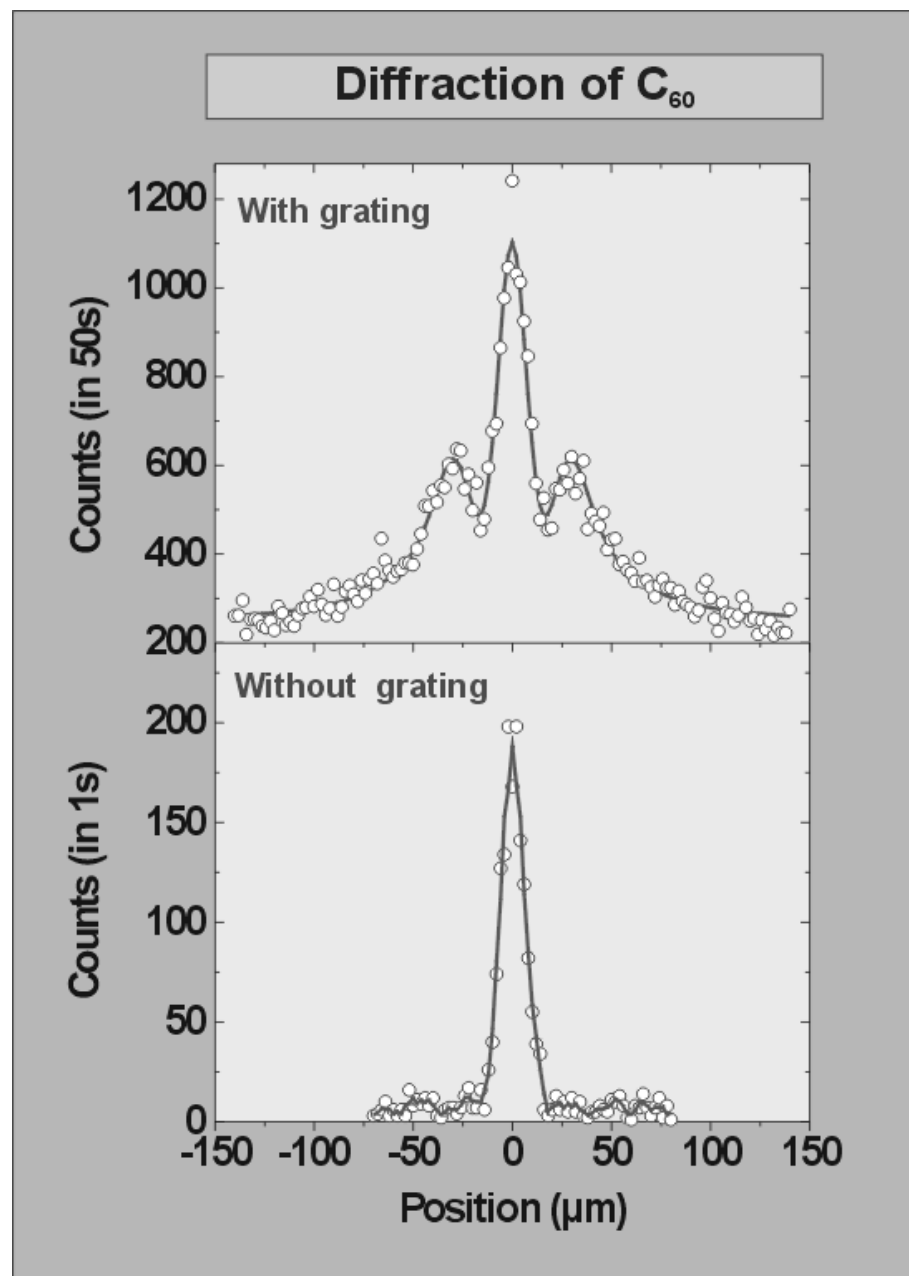
Experiment



Post-acceleration and detection of ions



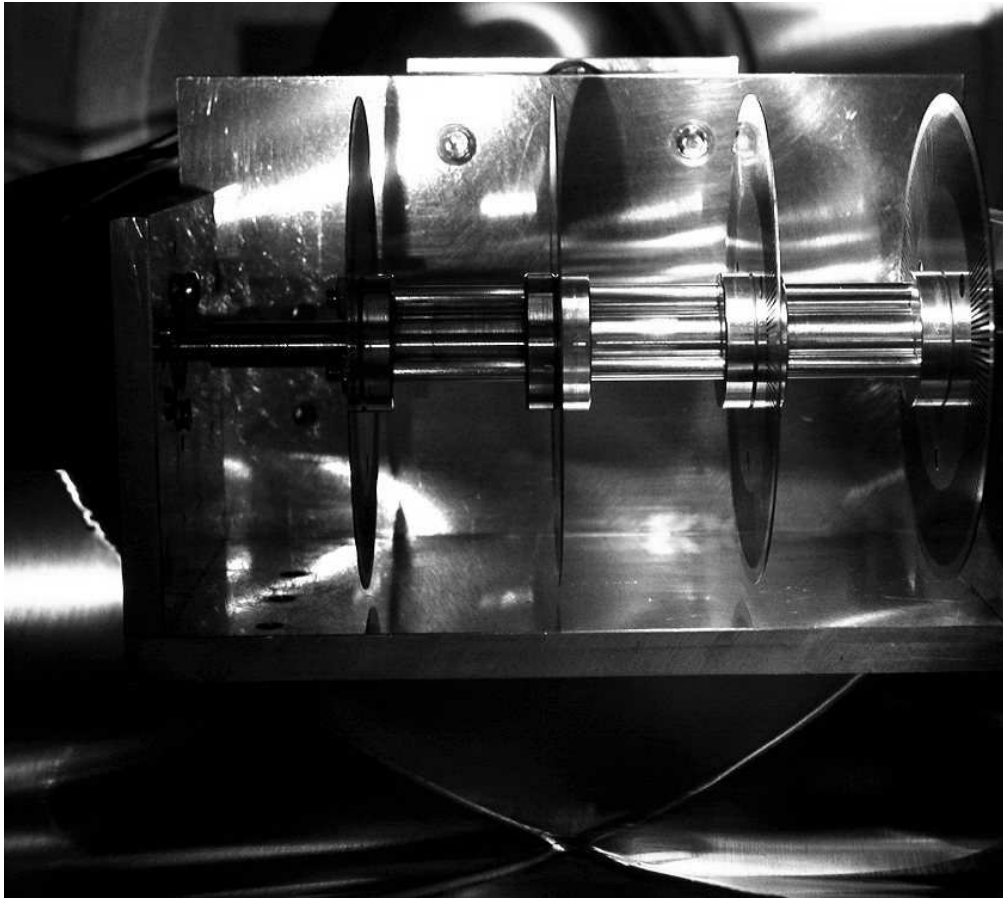
Výsledky



Vložení ozubených kol pro filtraci rychlostí

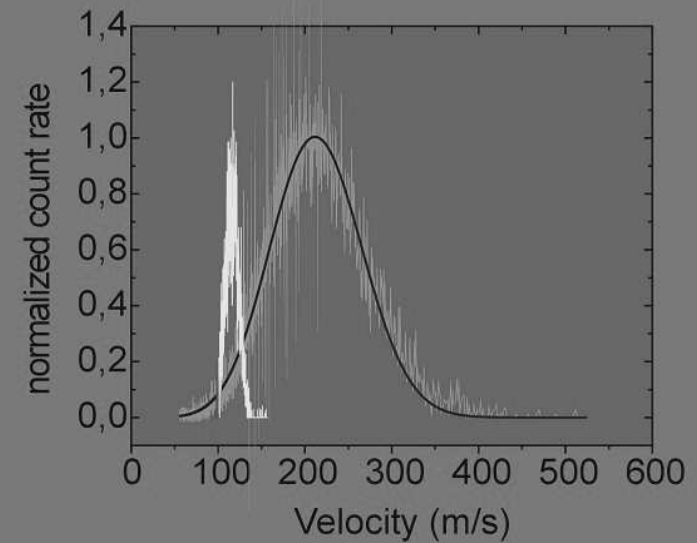


Vložení ozubených kol pro filtraci rychlostí



Velocity Distribution

orange: unselected thermal beam
yellow: with slotted disk selector

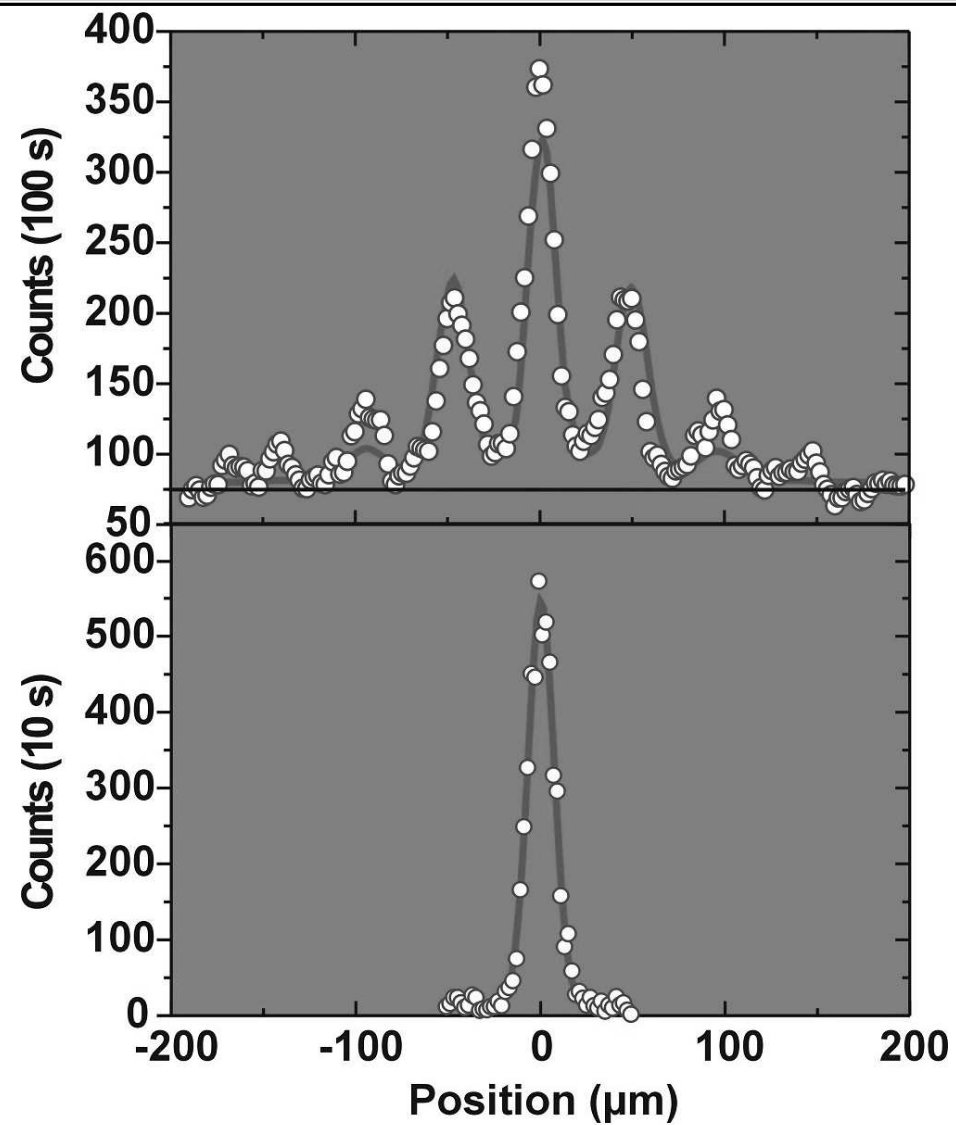


where:

$$v_0 = 165 \text{ m/s}$$

$$v_m = 92 \text{ m/s}$$

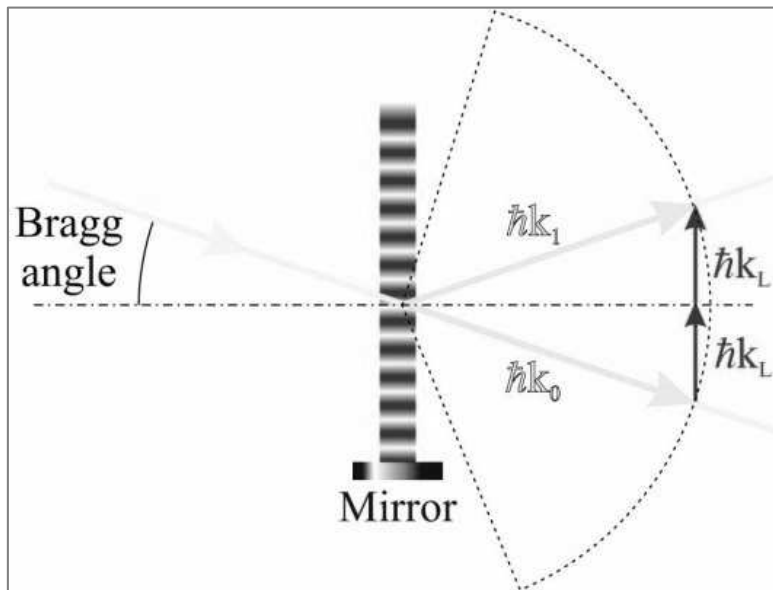
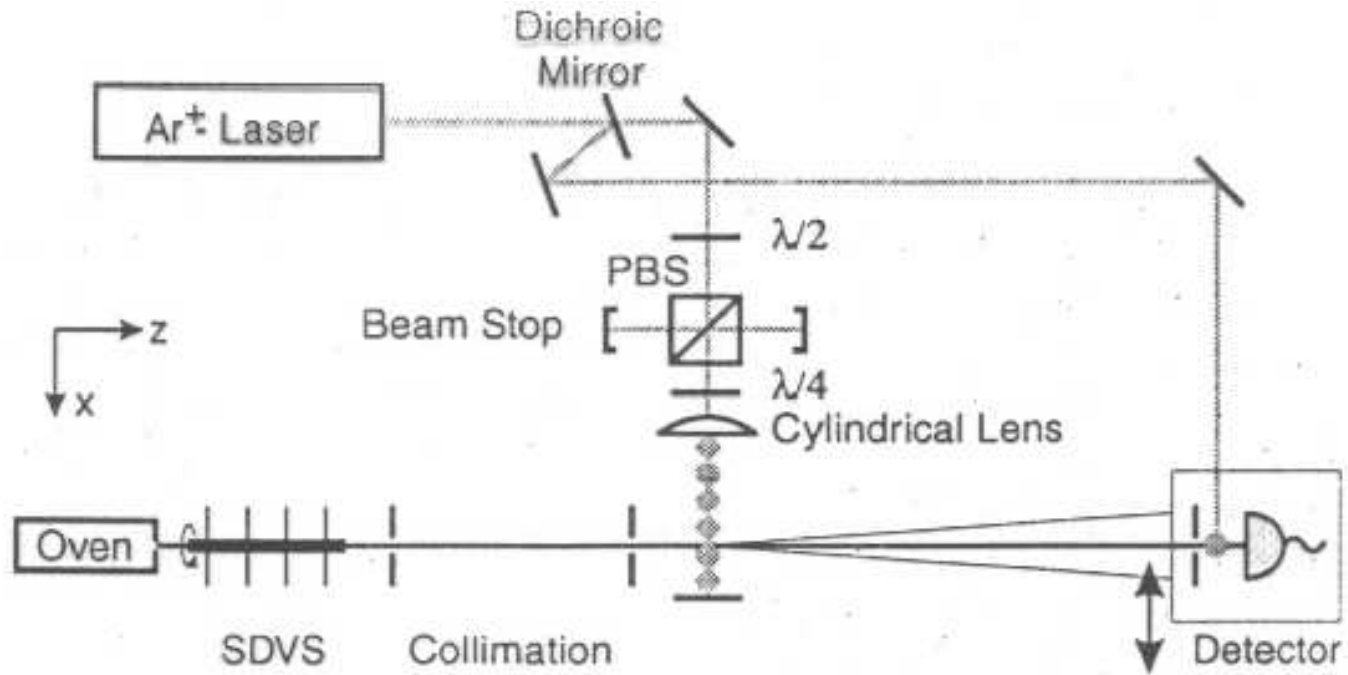
Zlepšení difrakčního obrazce



Nairz, Arndt, Zeilinger: unpublished

difrakce velkých molekul na světle

Světelná mřížka



onové záření

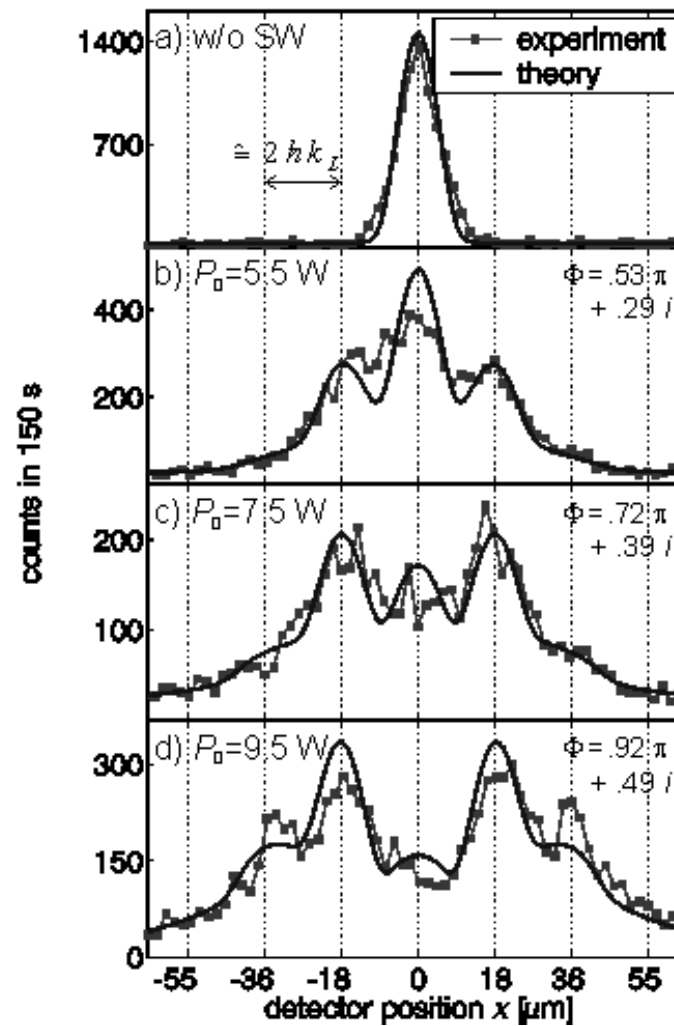
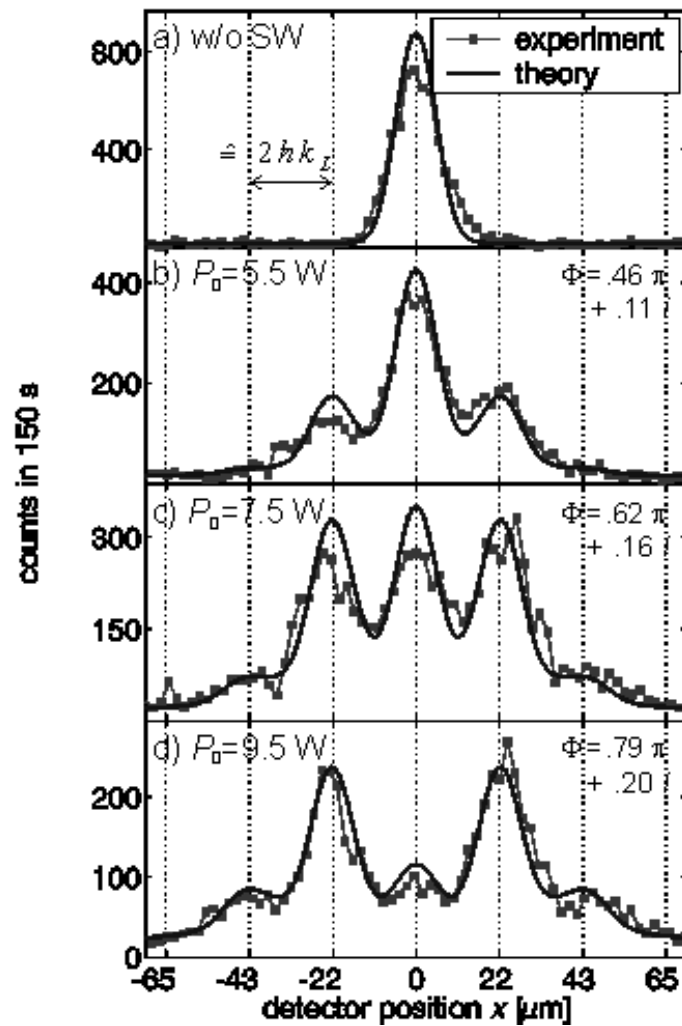
DVOJÍ ROVNOCENNÁ INTERPRETACE

- periodická světelná vlna
→ periodický potenciál → difrakce
- absorpce a emise fotonu
→ přenos hybnosti → difrakce

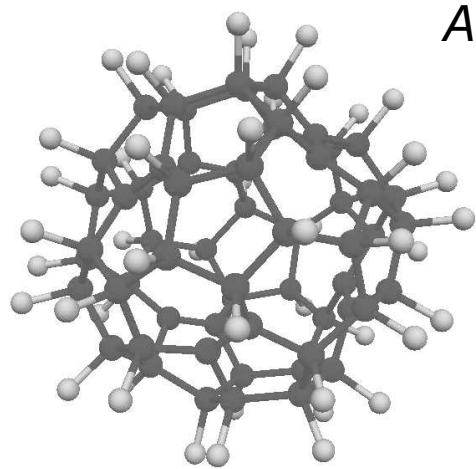
Výsledky

C_{60}

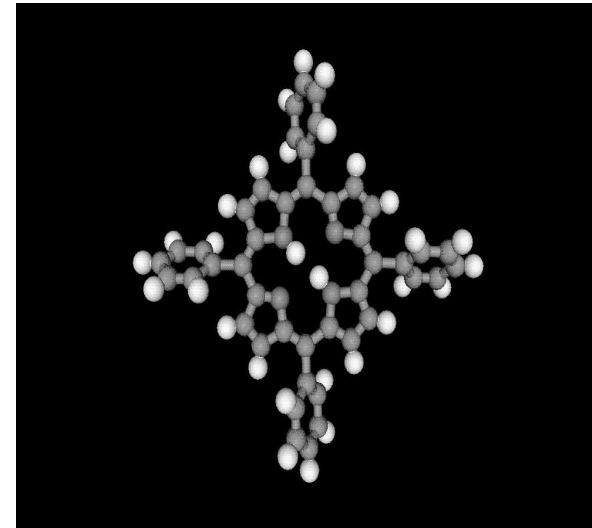
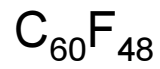
C_{70}



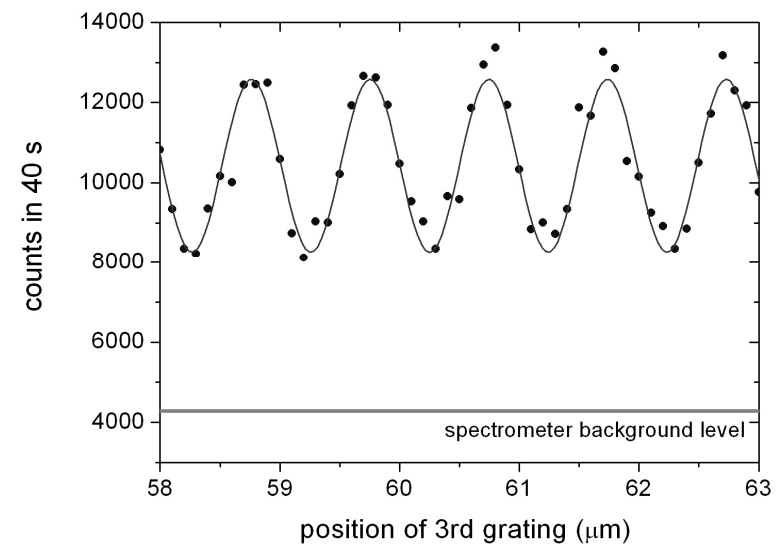
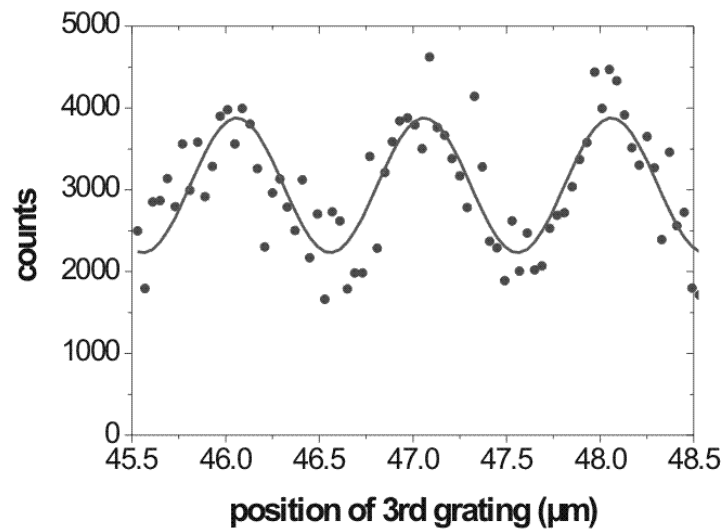
Interferenční proužky biomolekul



A=1632



porfyrin



Závěr

Netušíme, kde je mez

Zeilinger mluví o malých virech ...

The end