

Přehled posledních experimentů skupiny kvantové a nelineární optiky v Olomouci

Jan Soubusta, Antonín Černoch, Karel Lemr, Karol Bartkiewicz, Radek Machulka,

Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního Ústavu AV ČR,
17. listopadu 50A, Olomouc



..... a další kolegové



Rokytnice nad Jizerou,
20.5. 2014

Obsah přednášky

Motivace

1. Kvantová informatika u nás
2. SHG v periodicky pólovaném KTP
3. Luminiscence uhlíkových teček
4. Fluorescence nelineárních krystalů

Motivace



Historie miniaturizace elektroniky

Replika prvního tranzistoru:



Tranzistorový efekt byl objeven v Bellových laboratořích (W. Shockley, J. Bardeen, W. Brattain) 16. prosinec 1947.

Semiconductor manufacturing processes

10 μm – 1971

3 μm – 1975

1.5 μm – 1982

1 μm – 1985

800 nm – 1989

600 nm – 1994

350 nm – 1995

250 nm – 1997

180 nm – 1999

130 nm – 2002

90 nm – 2004

65 nm – 2006

45 nm – 2008

32 nm – 2010

22 nm – 2012

14 nm – 2014

10 nm – 2016

7 nm – 2018

5 nm – 2020

4-bitový mikroprocesor Intel 4004



32-bitový mikroprocesor

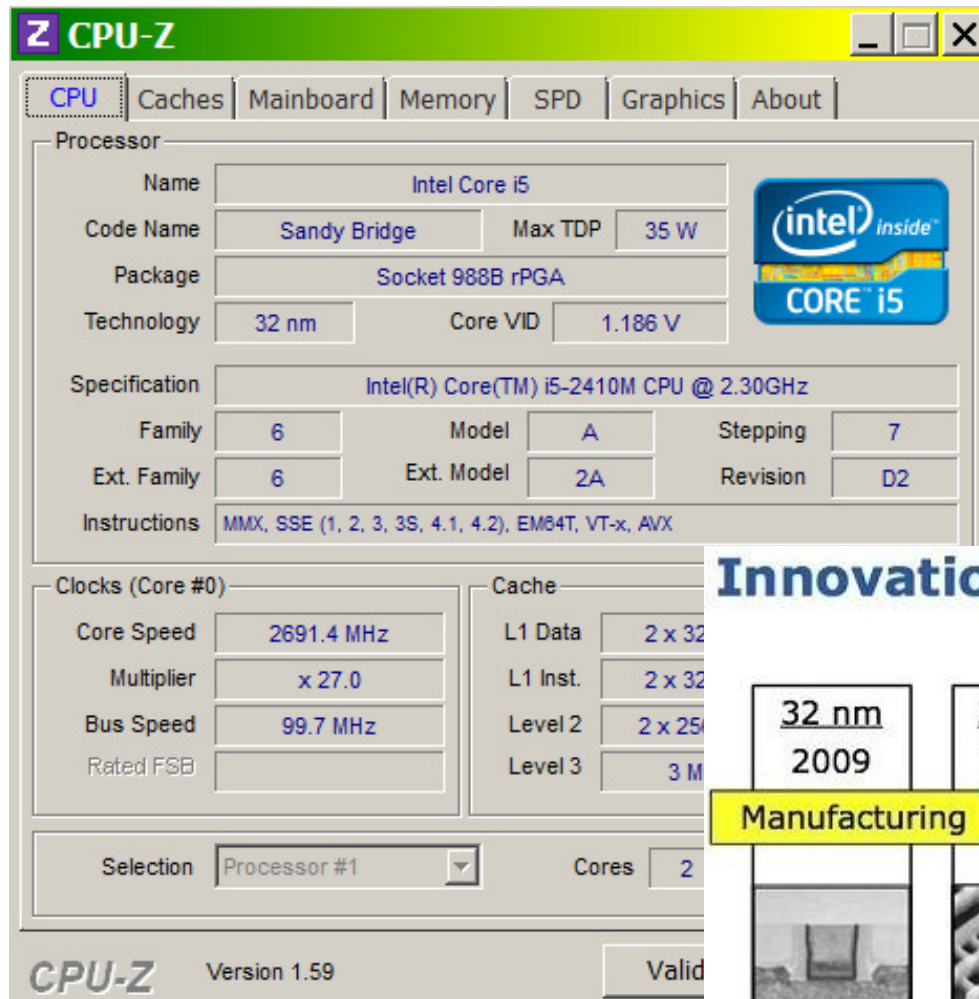


64-bitový mikroprocesor

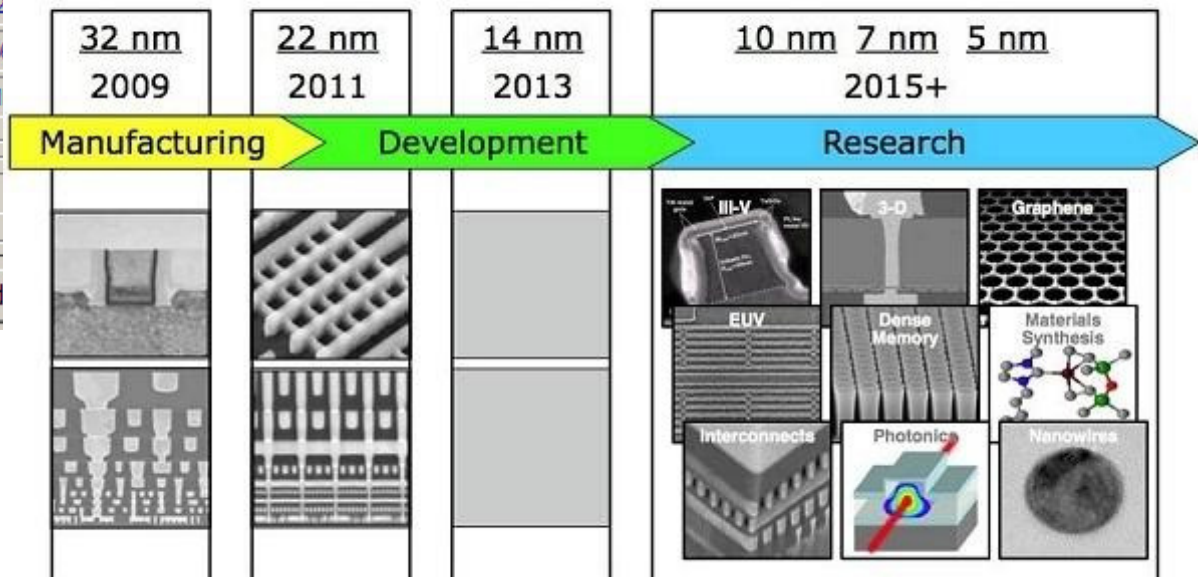


Pro zmenšování velikosti součástek platí **zatím** Mooreův zákon.

Kde jsou hranice?



Innovation Enabled Technology Pipeline



Future options subject to change

Jak dál?

klasický počítač



Nová cesta vývoje?



kvantový počítač



Tento kvantový počítač umí dnes řešit pouze problém hledání minima zadané funkce (hledání základního stavu).

Proč kvantová informatika?

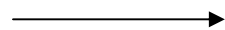
V poslední době probíhá intenzivní teoretický i experimentální výzkum, který se snaží obohatit možnosti klasických informačních technologií použitím kvantové mechaniky.

Vznikl nový obor → **kvantová informatika**

Sem patří kvantová kryptografie, kvantové výpočetní algoritmy.

Klasické bity informace

$\{0, 1\}$



Kvantová bity **Q-bity**

$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

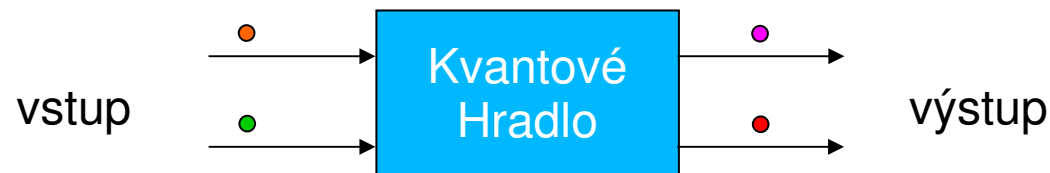
Kvantová informatika vyžaduje přesnou generaci q-bitů a přesnou manipulaci s nimi.

klasická hradla

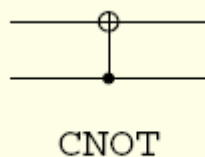


kvantová hradla

Každý kvantový výpočet lze rozložit na **jedno qubitové** a **dvou-qubitové operace**.



$$|\psi_{\text{out}}\rangle = U^{\text{CNOT}} |\psi_{\text{in}}\rangle$$



$$U^{\text{CNOT}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Klasická pravdivostní tabulka se shoduje s transformační maticí operace kvantového kradla na kvantový stavu.

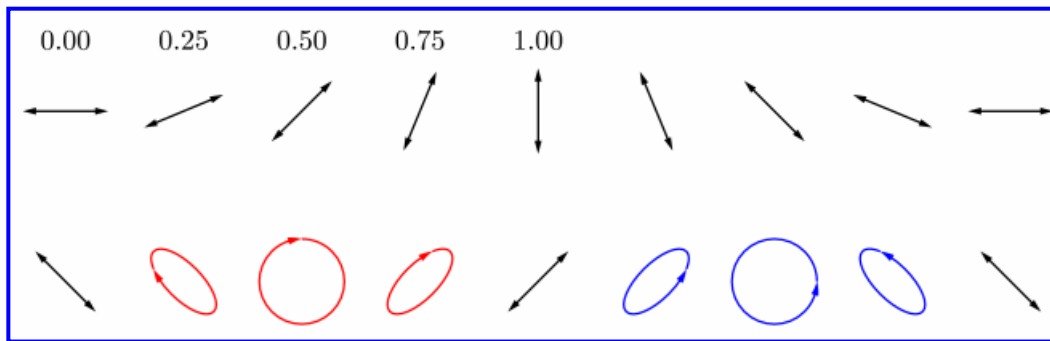
Proč kvantová informatika s fotony?

Klasický počítač pracuje s diskrétními bity '0' a '1',
kvantový počítač pracuje s kvantovými bity:

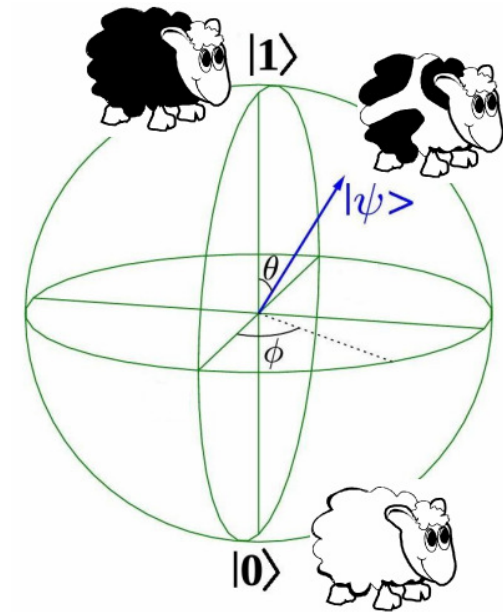
Q-bity

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Kvantový bit může v optice reprezentovat např. polarizace jednoho fotonu.



I jeden jediný foton může mít velmi přesně definovanou polarizaci.



Naše kvantová hradla jako stavební prvky kvantových počítačů a součástí kvantové informačních sítí

- SWAP hradlo pro částečné prohození / promíchání (2008)
- symetrizace / antisymetrizace stavu (2009)
- C-phase = kontrolovaný posun fáze (2011)
- QND = kvantové nedemoliční měření přítomnosti (2013)
- Q-amplifiers = zesilovače kvantových bitů (2013)
- Q-routers = směrovače v síti (2013)

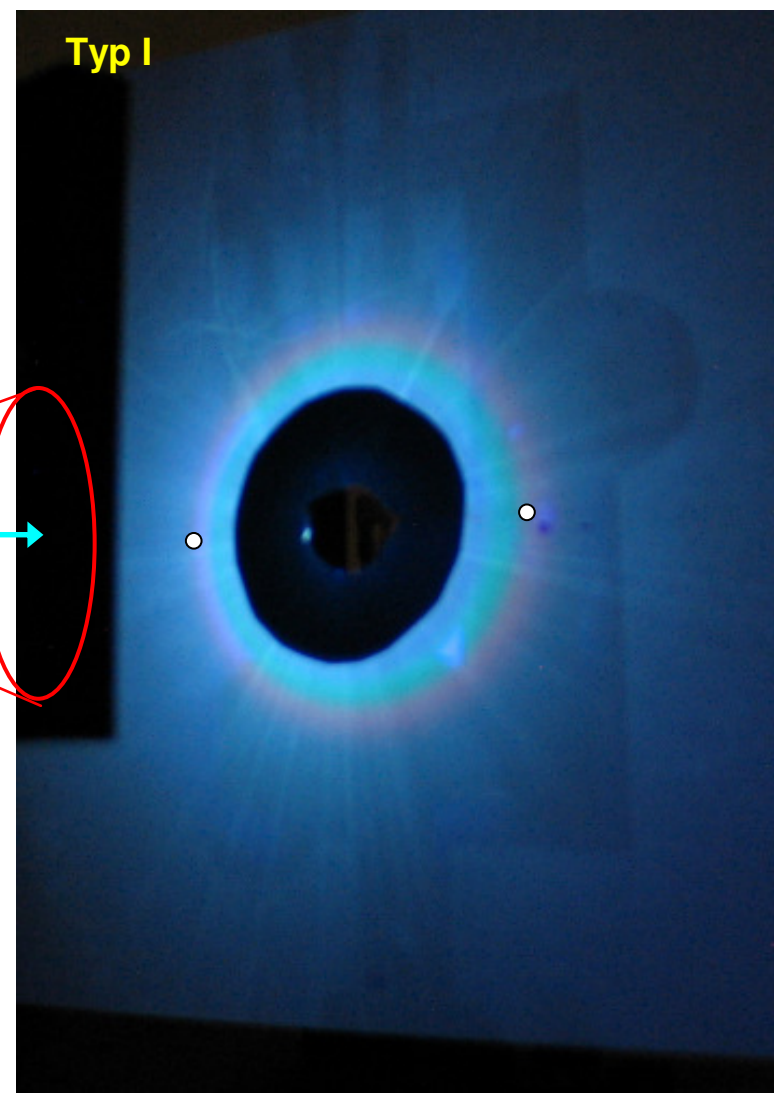
Parametrická sestupná frekvenční konverze (SPDC)

SPDC:

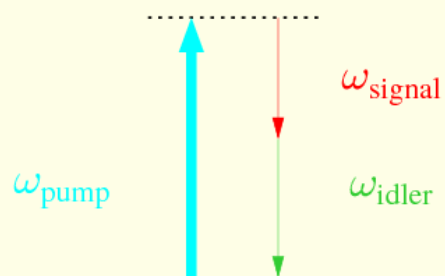
- je nelineární proces druhého řádu
- je inverzní proces proti generaci druhé harmonické
- generuje fotonové páry



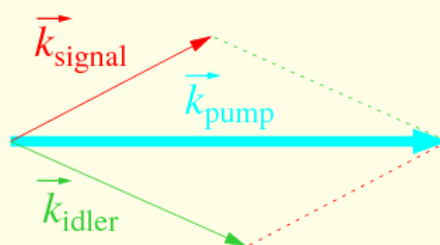
Kr laser @ 413 nm, 200 mW, vertikální polarizace



zákon zachování energie



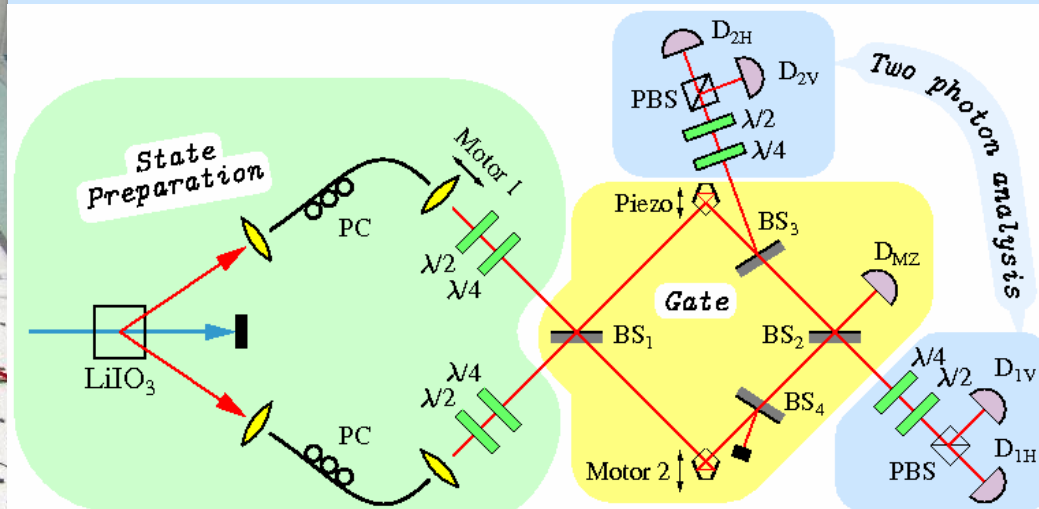
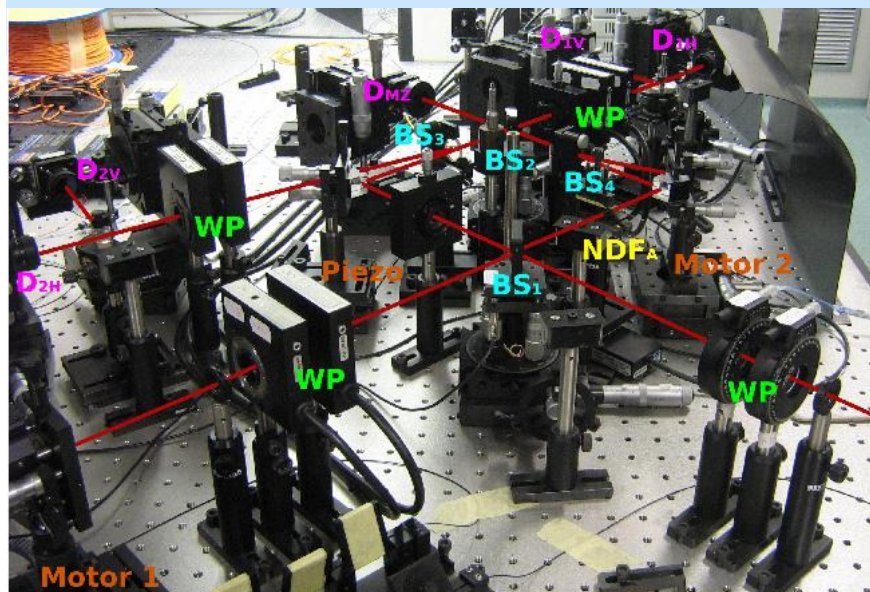
zákon zachování hybnosti



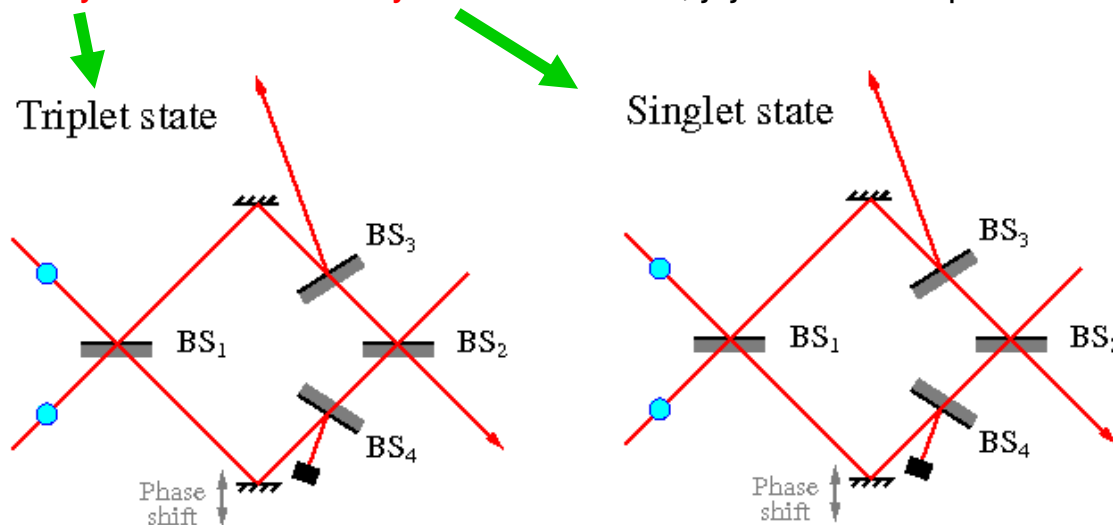
1. Kvantová informatika u nás



SWAP hradlo pro částečné prohození



Hradlo pracuje na principu rozložení vstupního 2-fotonového stavu na **symetrickou** a **anti-symetrickou** část, jejich fázovém posunu.



Funkce hradla

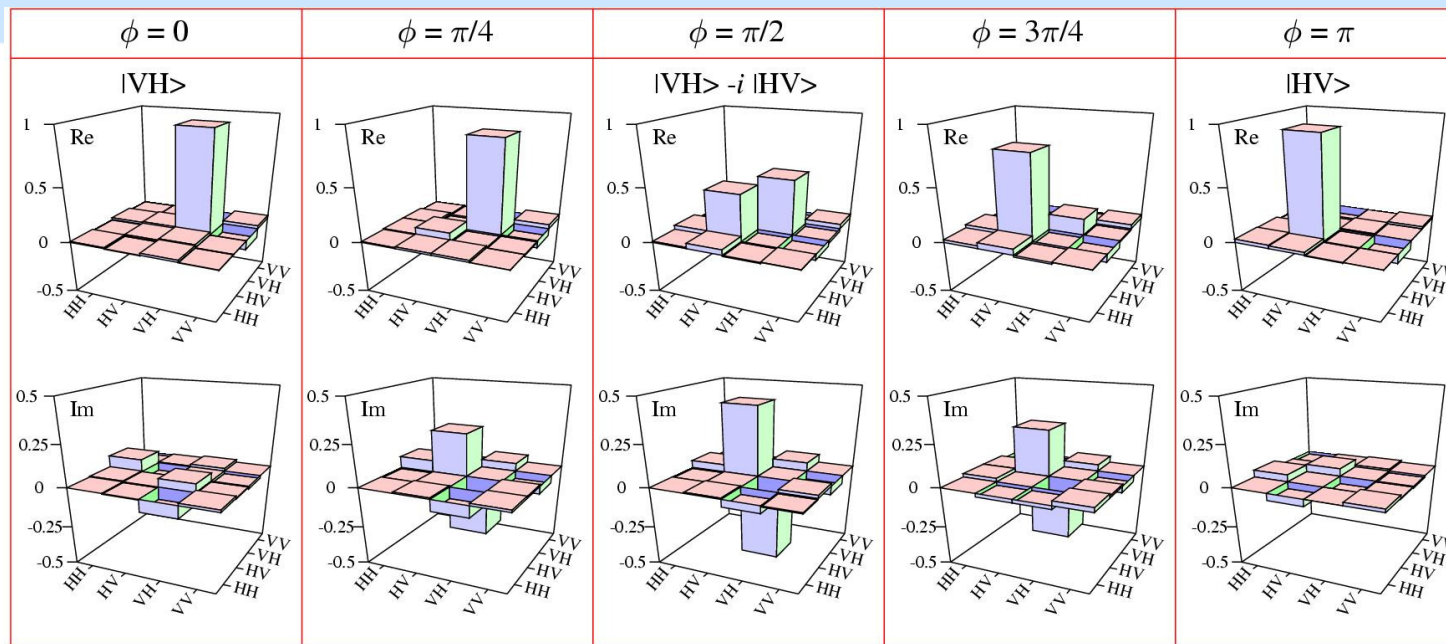
$$U_\phi = \Pi_+ + e^{i\phi} \Pi_-$$

$$\Pi_- = |\Psi^-\rangle \langle \Psi^-|$$

a

$$\Pi_+ = \mathbb{1} - \Pi_-$$

Partial SWAP gate



Různé operace hradla se dají zajistit nastavením klasického parametru – fáze v interferometru

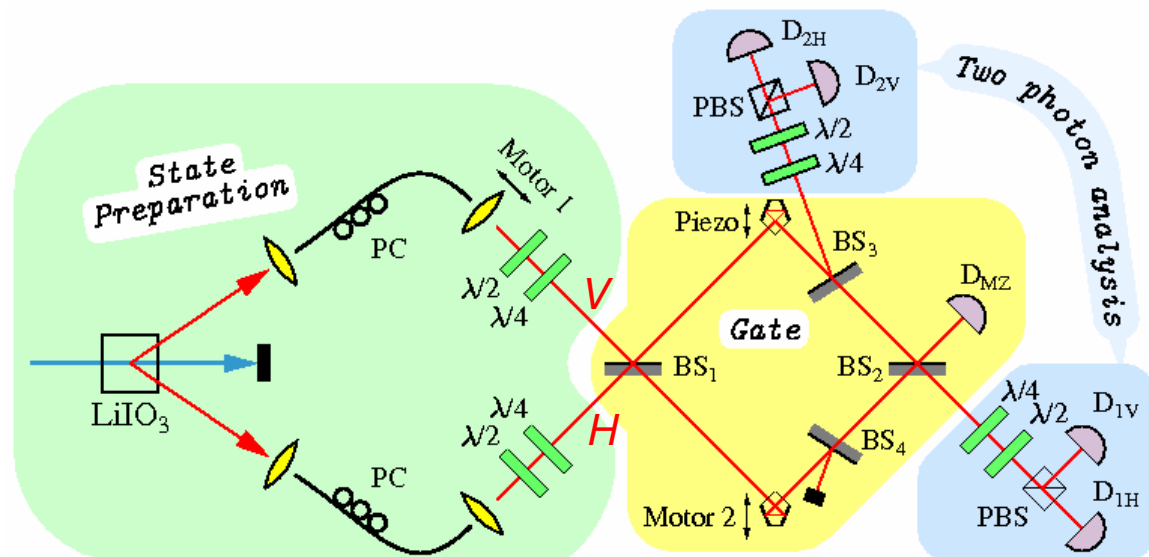
Nastavení funkce:

$\phi = 0, 2\pi \Rightarrow \text{Identita}$

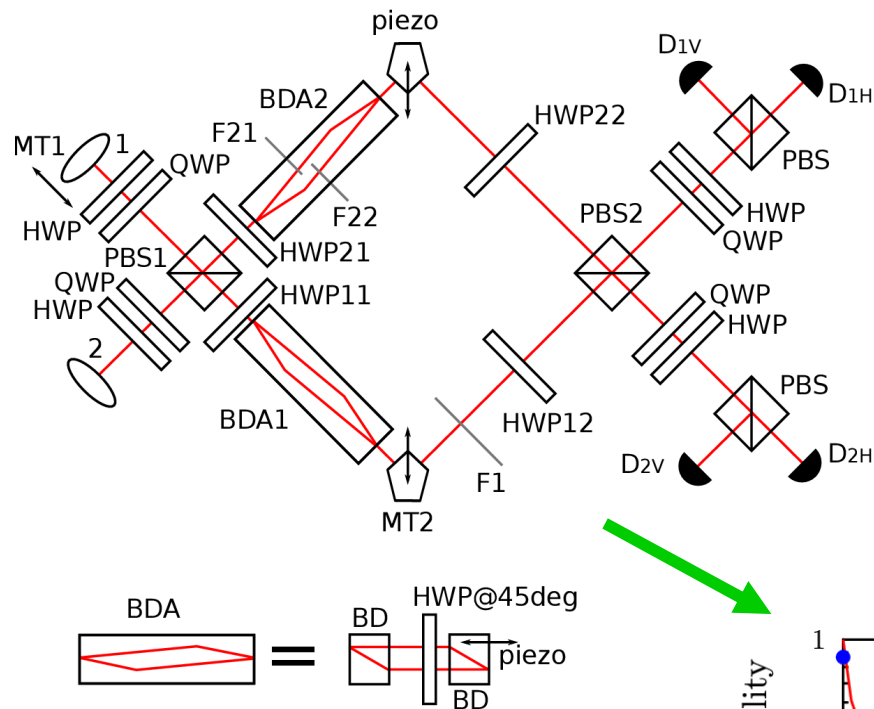
$\phi = \pi \Rightarrow \text{SWAP}$

$\phi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \Rightarrow \sqrt{\text{SWAP}}$

$P_{\text{succ}} = 1/8$



C-Phase hradlo pro kontrolovaný posun fáze

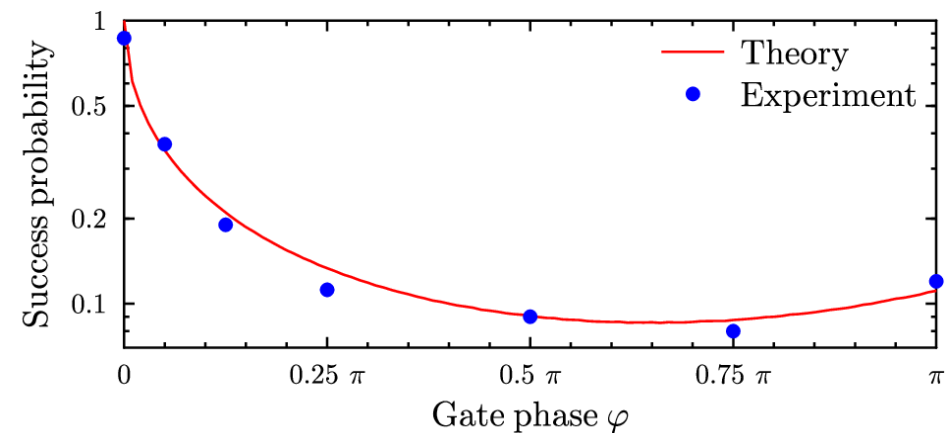


Operace hradla

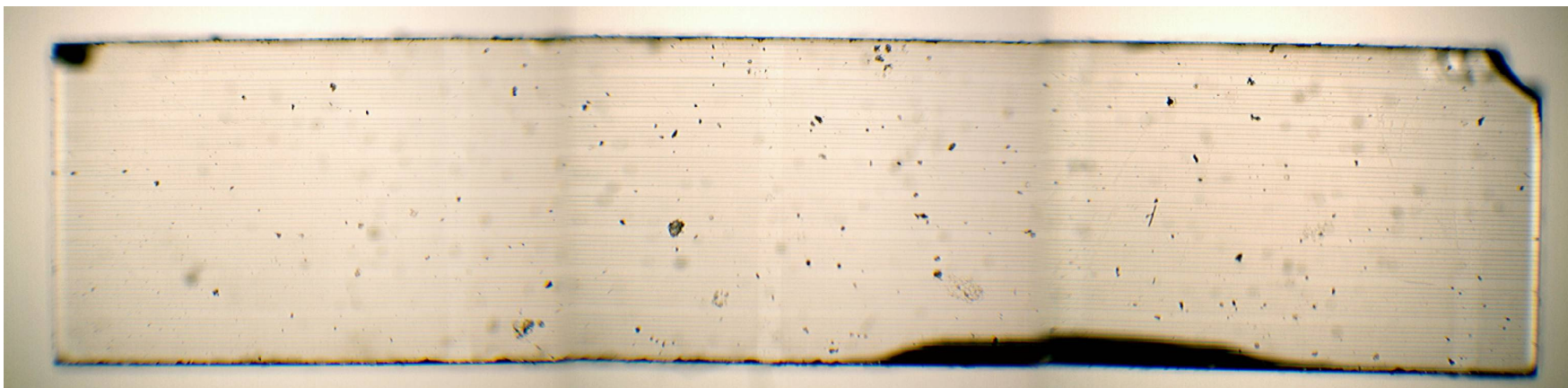
$$\begin{aligned} |0, 0\rangle &\mapsto |0, 0\rangle, \\ |0, 1\rangle &\mapsto |0, 1\rangle, \\ |1, 0\rangle &\mapsto |1, 0\rangle, \\ |1, 1\rangle &\mapsto e^{i\varphi} |1, 1\rangle, \end{aligned}$$

Hradla na bázi lineární optiky mají pravděpodobnost úspěchu < 100 %.

Experimentálně jsme ověřili teoretickou předpověď tvaru závislosti funkce pravděpodobnosti úspěchu na fázi.



2. SHG v periodicky pólovaném KTP

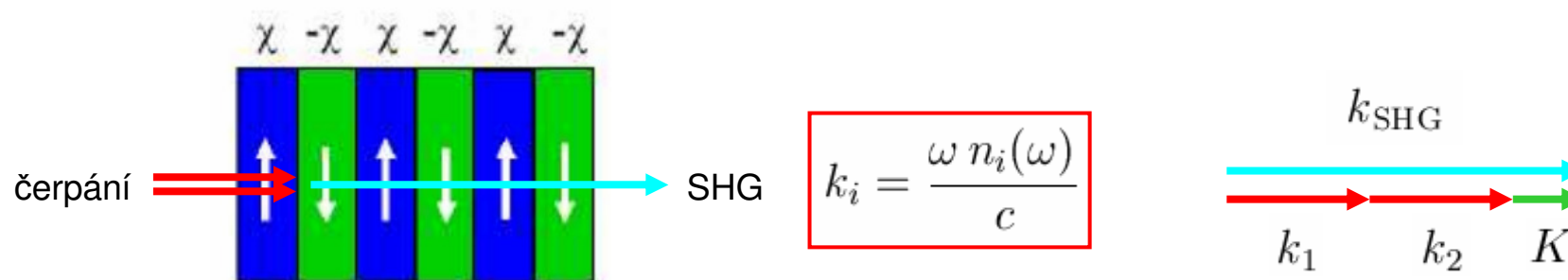


Generace druhé harmonické (SHG)

SHG se získá řešením vlnové rovnice v nelineárním prostředí

$$\Delta \vec{E} - \frac{1 + \chi_{\text{eff}}^{(1)}}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}_{\text{NL}}}{\partial t^2}$$

Proces SHG musí splňovat zákony zachování energie a vlnového vektoru (hybnosti).



Podmínku fázové synchronizace lze splnit v oblasti normální disperze díky:

1. anizotropii
2. periodickému pólování

$$\vec{k}_{\text{SHG}} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{K}; \quad |\vec{K}| = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

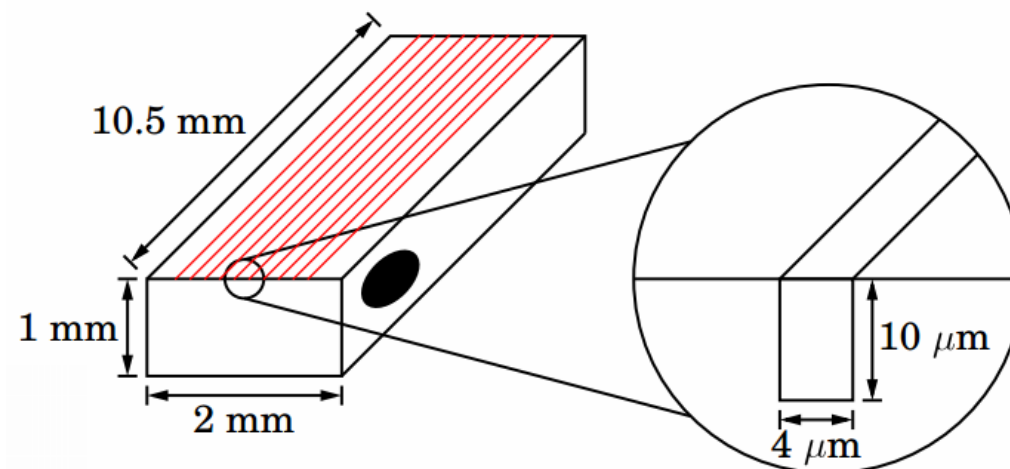
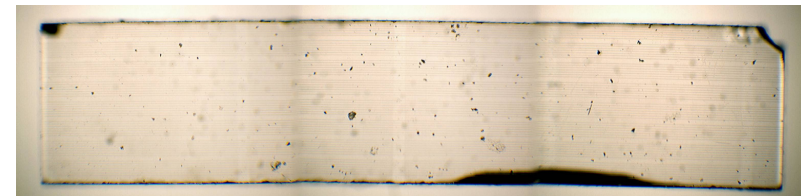
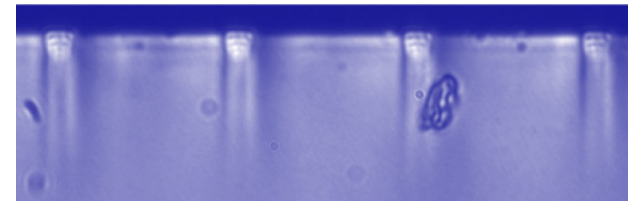
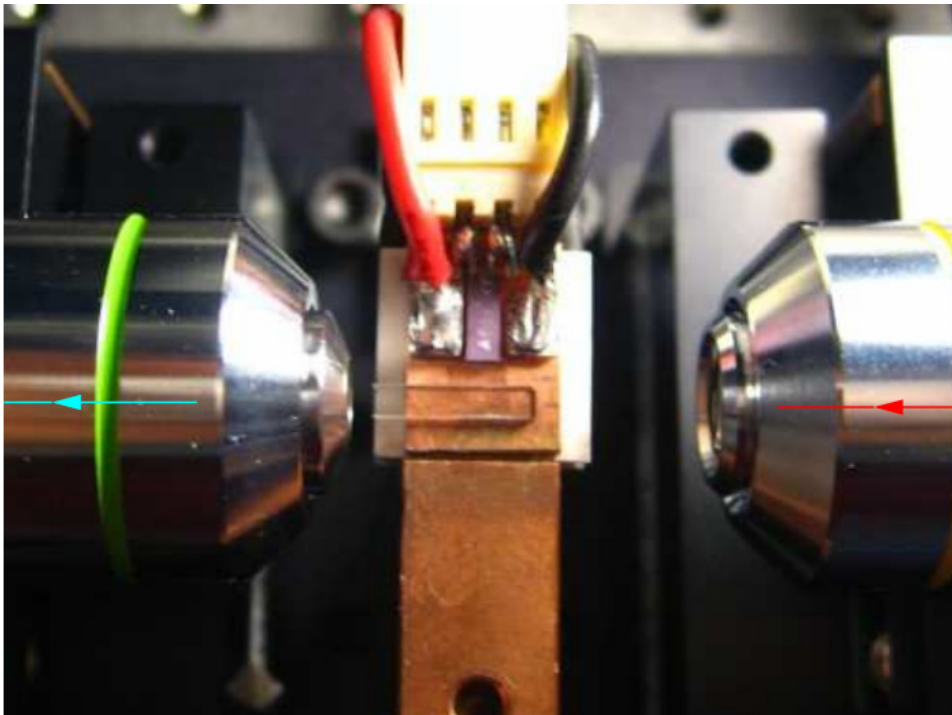
Nová podmínka kvazi-fázové synchronizace obsahuje vlnový vektor $\mathbf{K}$, který je daný periodou pólování feroelektrického materiálu.

V materiálu je vytvořena mřížka s typickou periodou 5-15 μm

P.A. Franken, et al., Phys. Rev. Lett. 7, 118 (1961).

J. A. Armstrong, et al., Phys. Rev. 127, 1918-1939 (1962).

Jak vypadá periodicky pólované KTP (PP-KTP)?

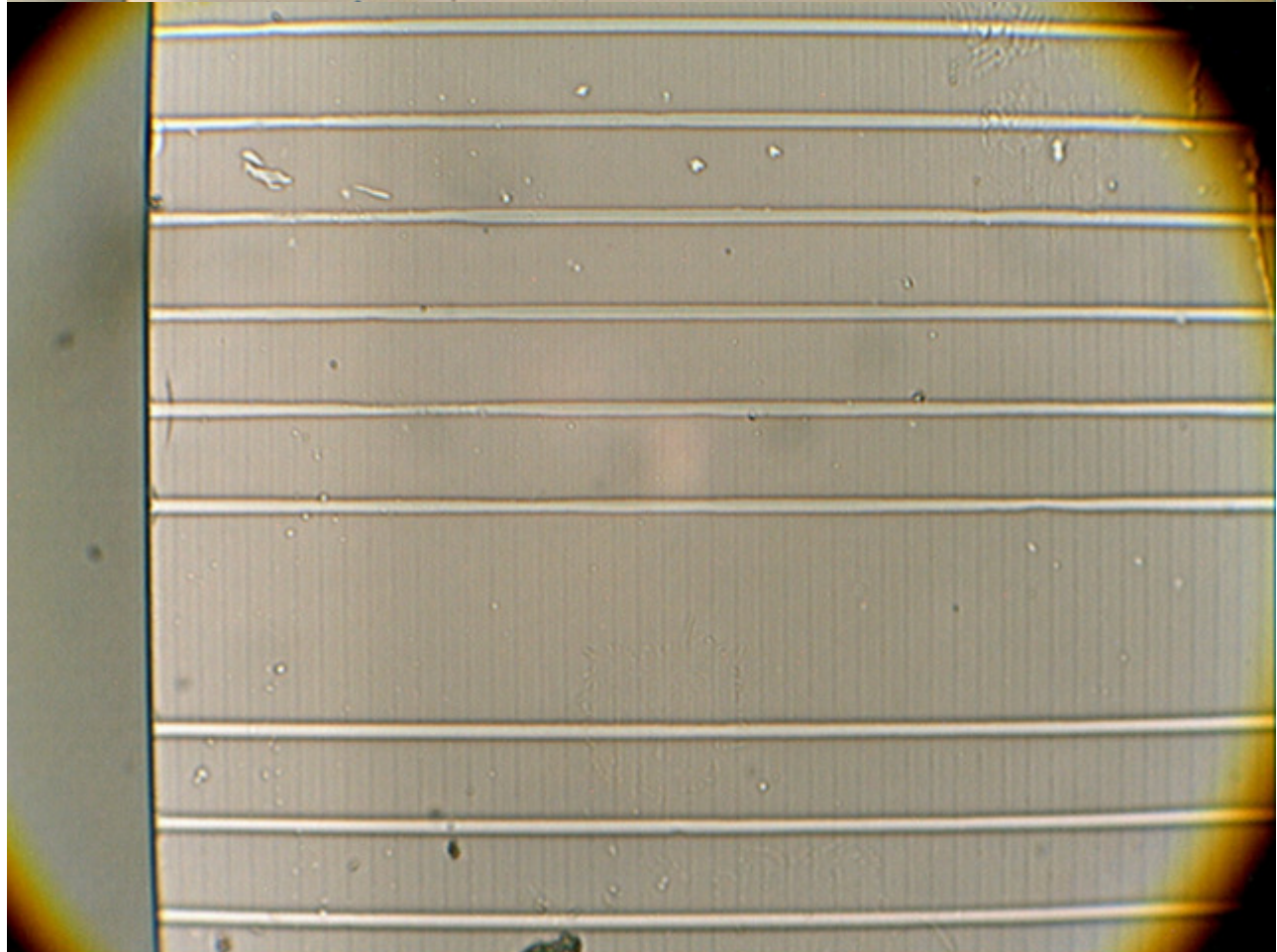


Pod mikroskopem

Objektiv 10x

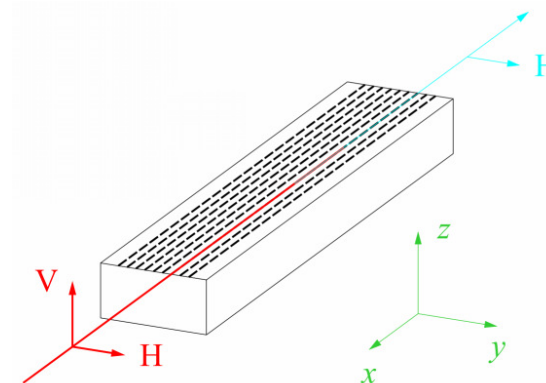
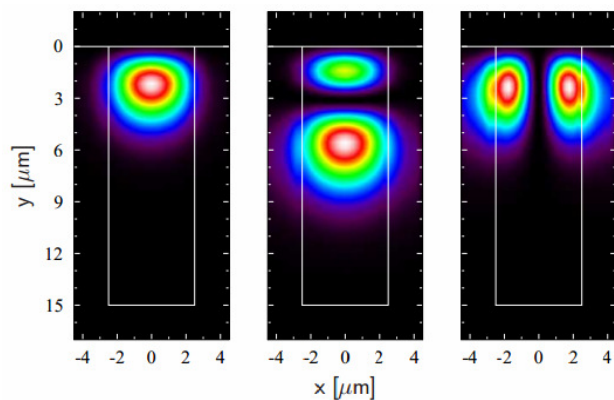


Objektiv 40x

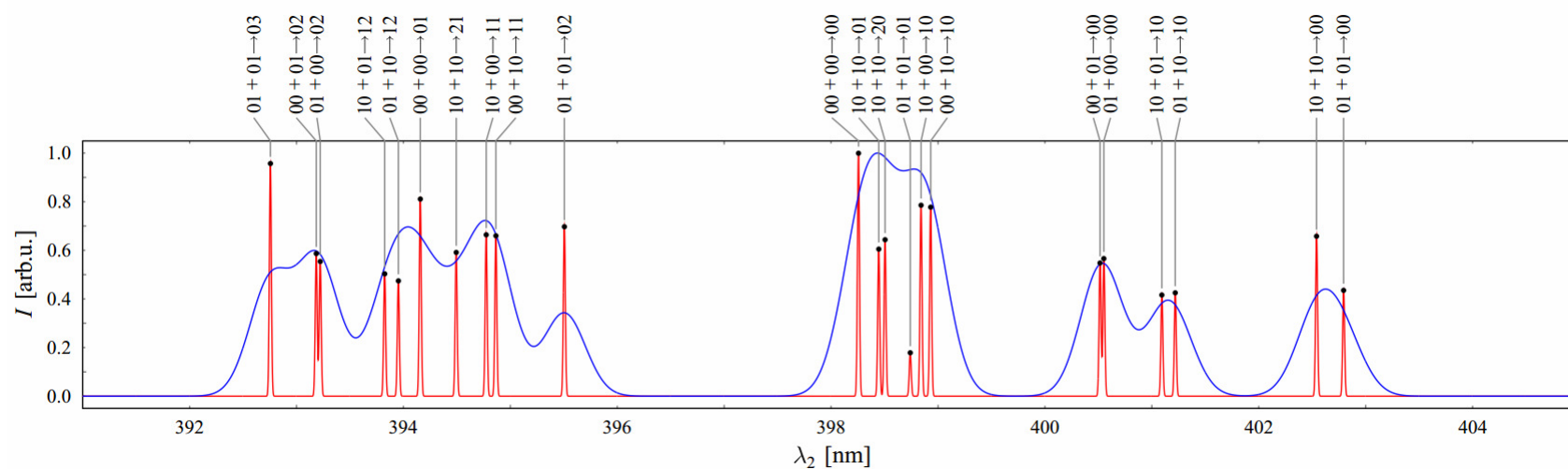


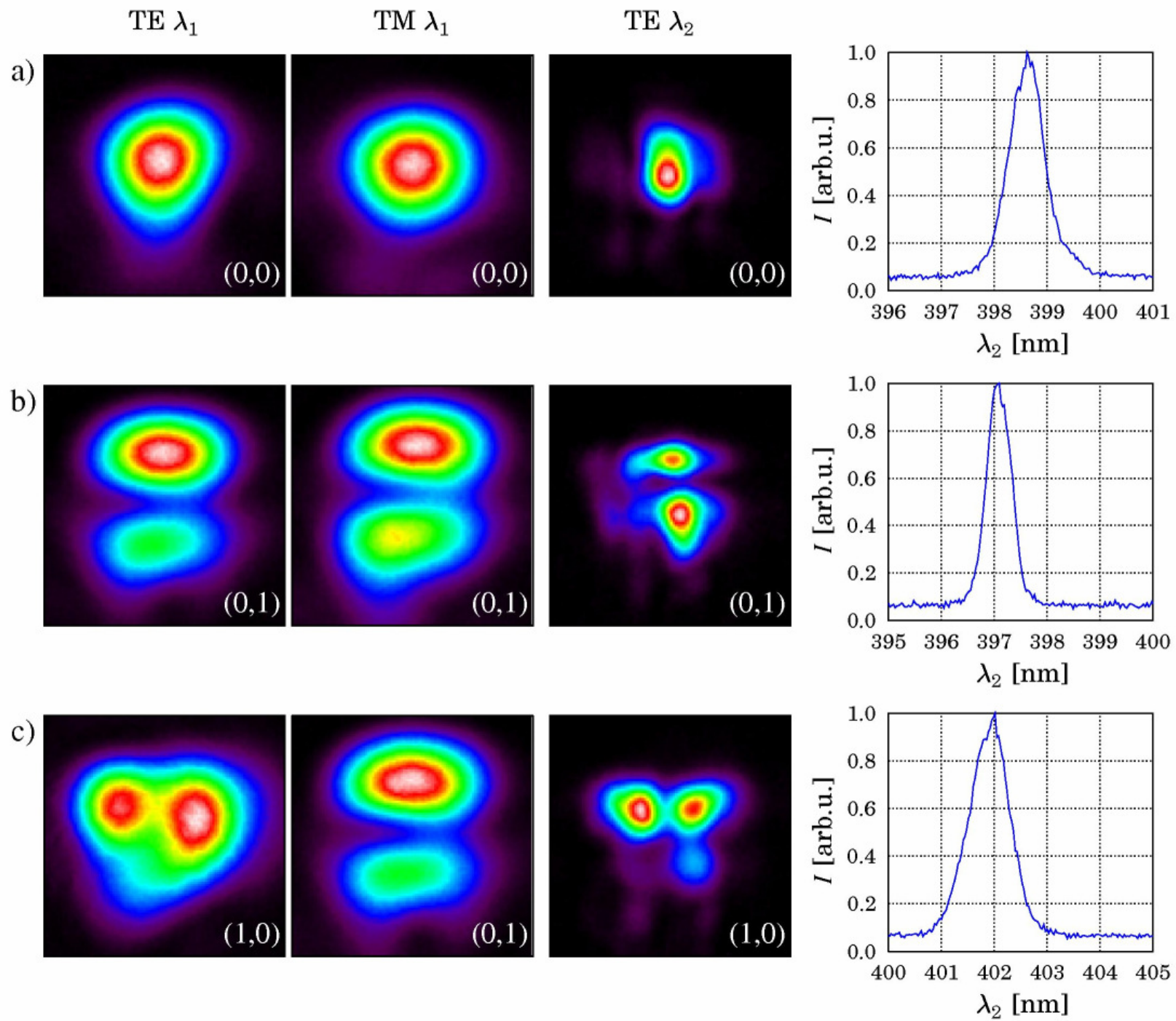
Výsledky teoretického modelu

prostorový profil módů na 800 nm



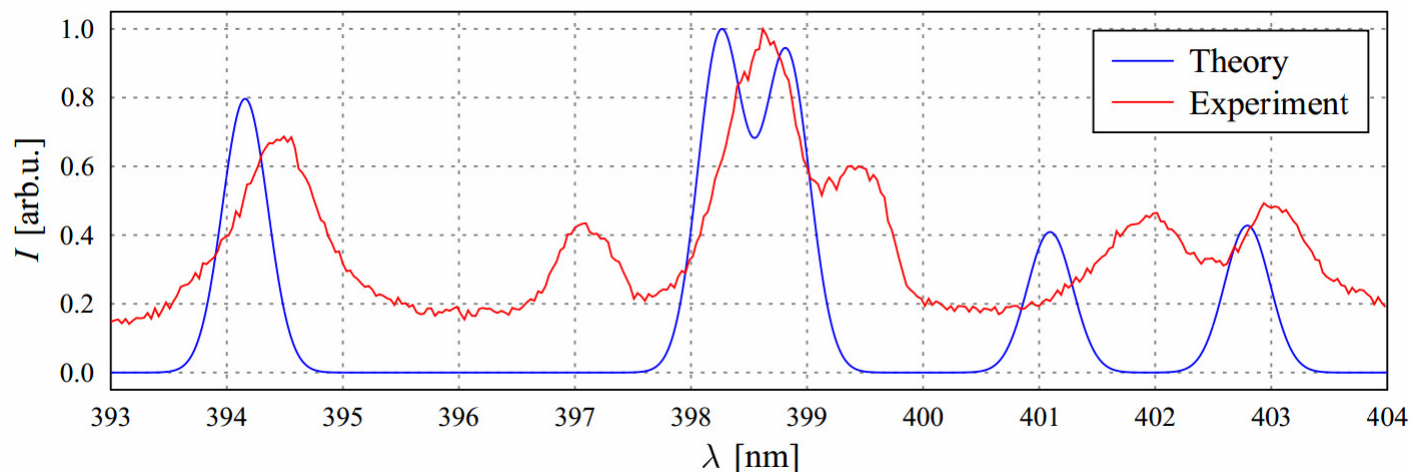
SHG spektrum při čerpání v okolí 800 nm





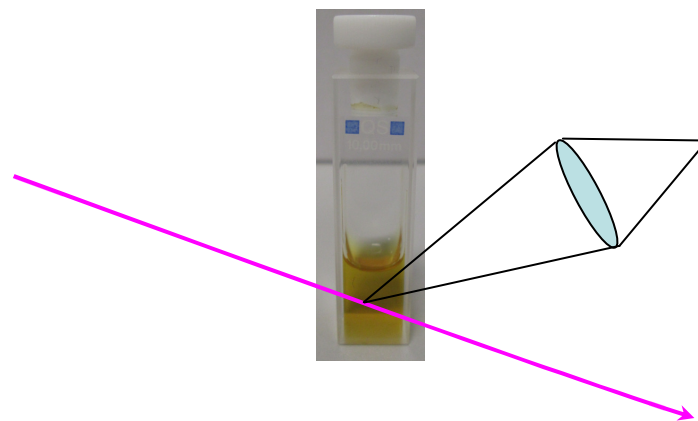
Porovnání teorie s experimentem

Modes (TE + TM $\rightarrow$ TE)	$\lambda_{2,\text{exp}}$ [nm]	$\lambda_{2,\text{theor}}$ [nm]	$\Delta\lambda_{2,\text{exp}}$ [nm]	P_{exp} [arb.u.]	P_{theor} [arb.u.]
00 + 00 $\rightarrow$ 00	398.3	398.6	0.8	1.00	1.00
00 + 00 $\rightarrow$ 01	394.2	394.4	0.9	0.65	0.81
10 + 00 $\rightarrow$ 10	398.8	399.5	0.6	0.42	0.78
01 + 01 $\rightarrow$ 00	402.8	403.0	0.8	0.38	0.43
10 + 01 $\rightarrow$ 10	401.1	401.9	0.9	0.35	0.42
01 + 01 $\rightarrow$ 01	398.7	397.1	0.6	0.32	0.18



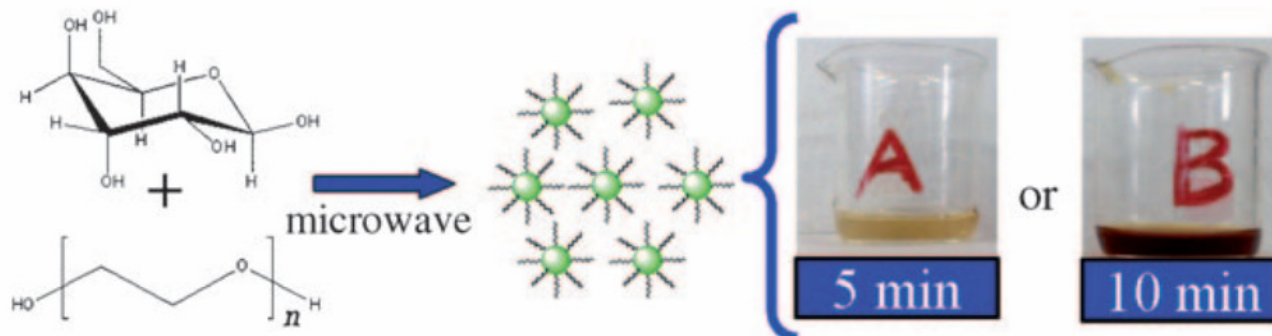
- PP-KTP materiál umožňuje tři různé polarizační konfigurace generace SHG.
- Teoretický výpočet – řešení vlnové rovnice metodou konečných prvků.
- Šířka a pozice spektrálních čar silně závisí na parametrech KTP vzorku.
- Spektrální a prostorovou filtrací lze rozsvítit vybranou čáru SHG spektra.

3. Luminiscence uhlíkových teček



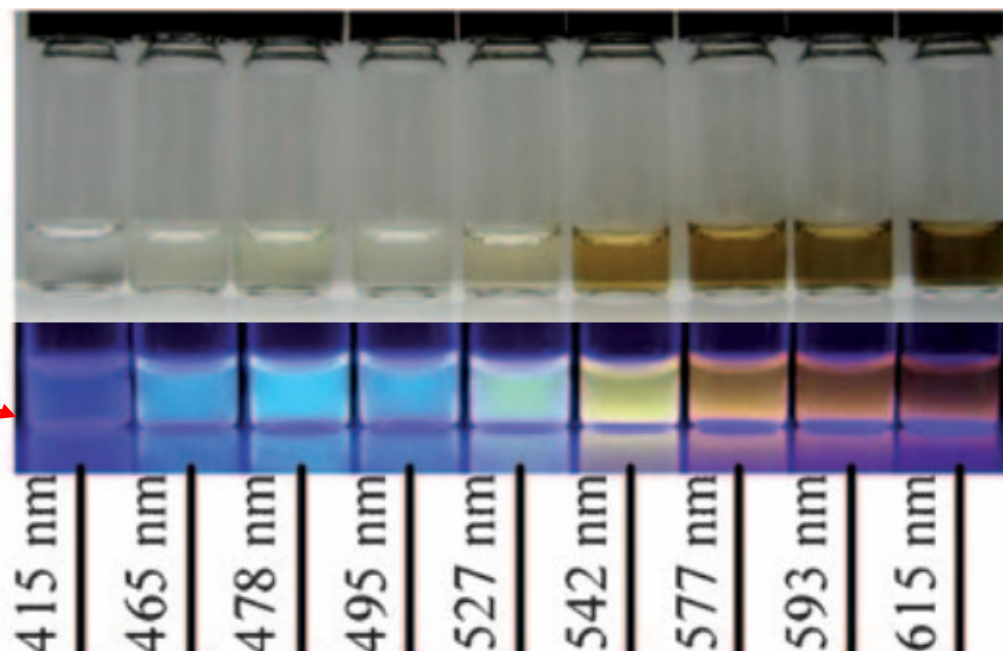
Příprava uhlíkových kvantových teček (CQD)

Roztok organických látek (např. glukóza, močovina, kyselina citrónová) se zahřeje v mikrovlnce na 500 W po dobu 2-10 min.



Výsledkem je tmavý roztok s uhlíkovými kvantovými tečkami o rozměru 2-4 nm. Delší čas zahřívání vede na větší tečky.

S velikostí teček se posouvá spektrum luminiscence.

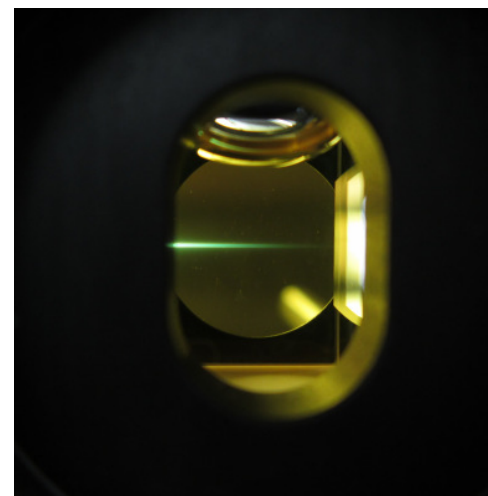
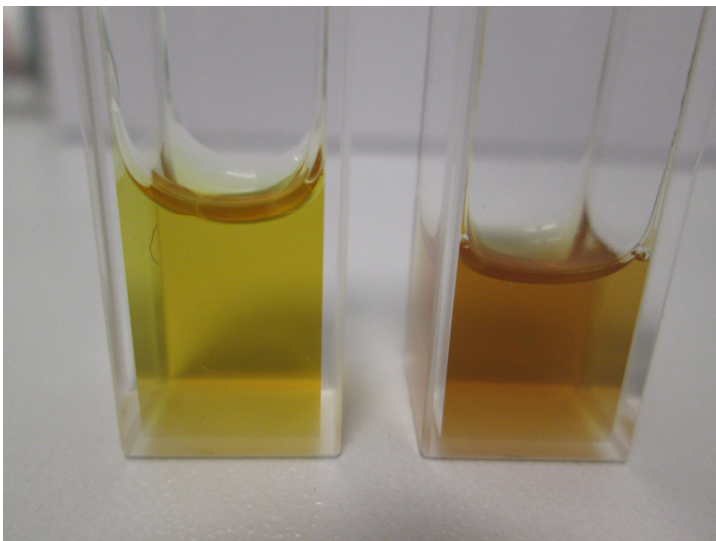


**REGIONÁLNÍ CENTRUM
POKROČILÝCH TECHNOLOGIÍ
A MATERIÁLŮ**

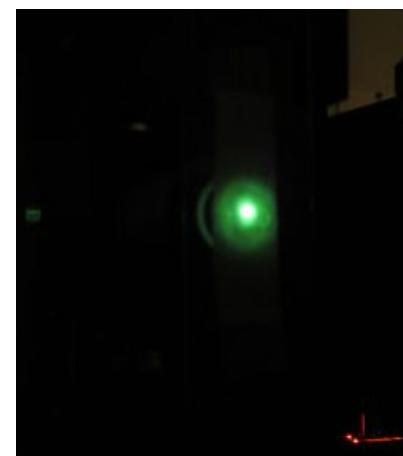
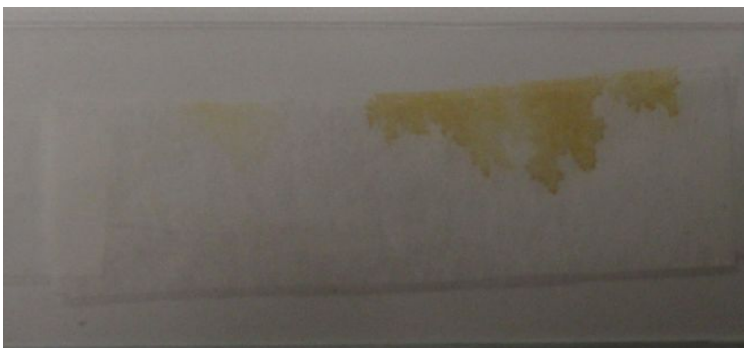
Regional Centre of Advanced Technologies and Materials

CQD syntetizované v Olomouci

ve vodném roztoku



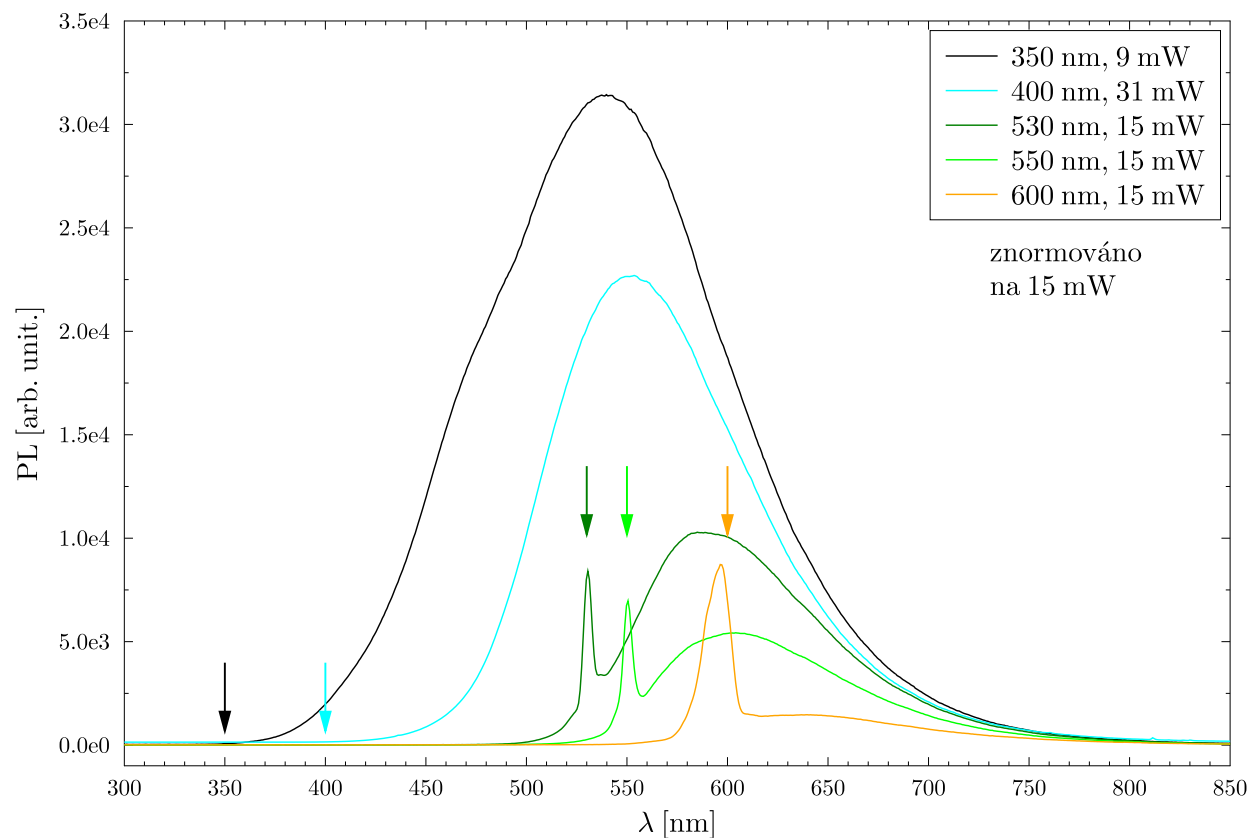
na čistícím ubrousku z mikrovláken



Pro viditelnou luminiscenci stačí výkon 0.1 mW na 400 nm.

PL spektra CQD

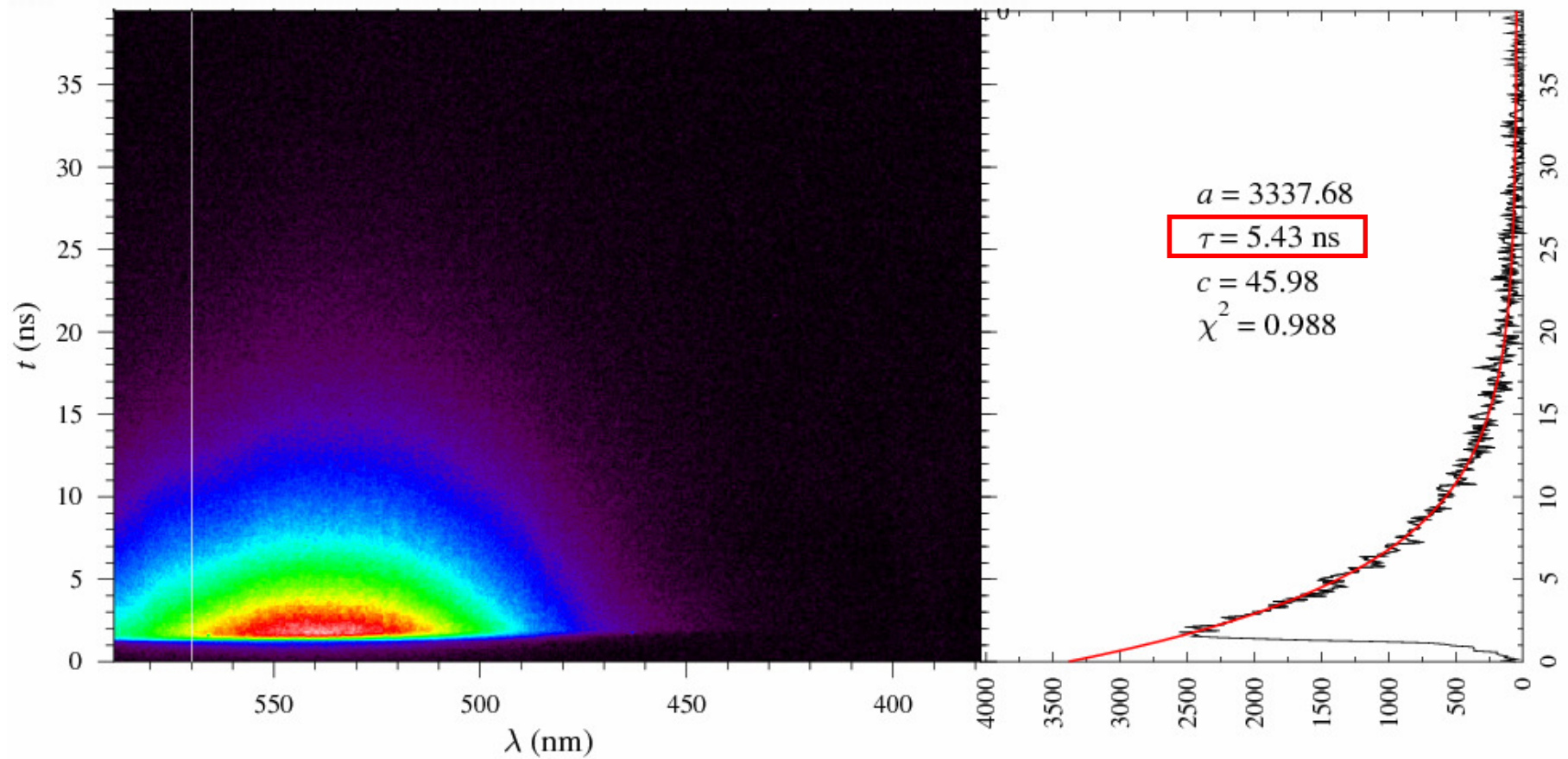
PL měřená vláknovým spektrákem OceanOptics QE65 Pro



Intenzita PL uhlíkových teček v roztoku klesá při prodlužování vlnové délky čerpacího laseru.
Nejllepší je čerpání na modré (400 nm) nebo v UV (350 nm).

PL CQD s časovým rozlišením

čerpání 400 nm, 15 mW



Při čerpání UV nebo modrou jsou doby dosvitu 5-7 ns,
Směrem do dlouhovlnné oblasti se dosvit PL zkracuje.
Při čerpání na zelené se objevuje druhý rychlejší proces (1 ns).

Mikroskopie vzorků CQD na mikrovláčknech



Mikroskop Olympus

CONFOCAL LASER SCANNING
MICROSCOPE

LEXT™

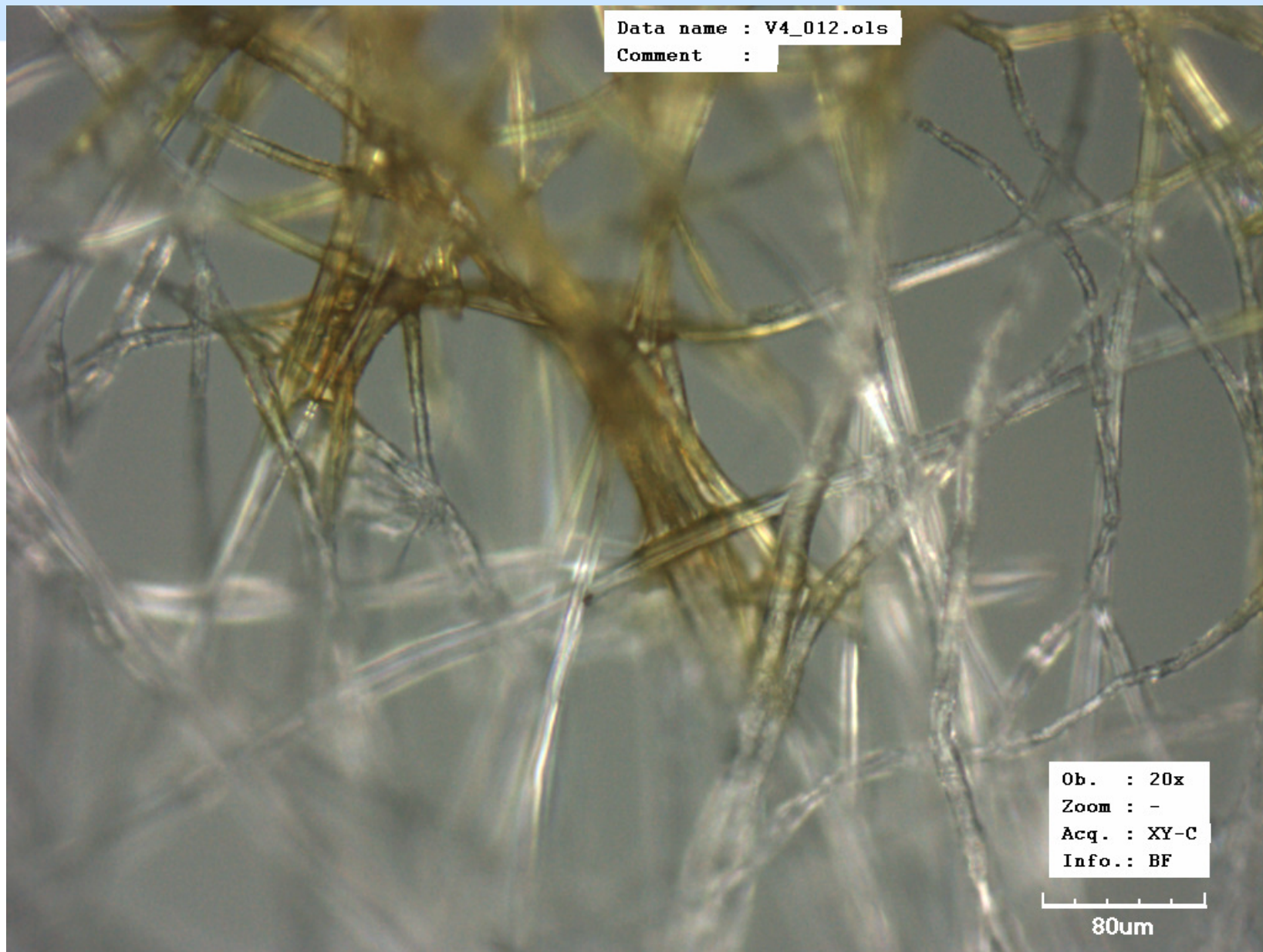
OLS3100

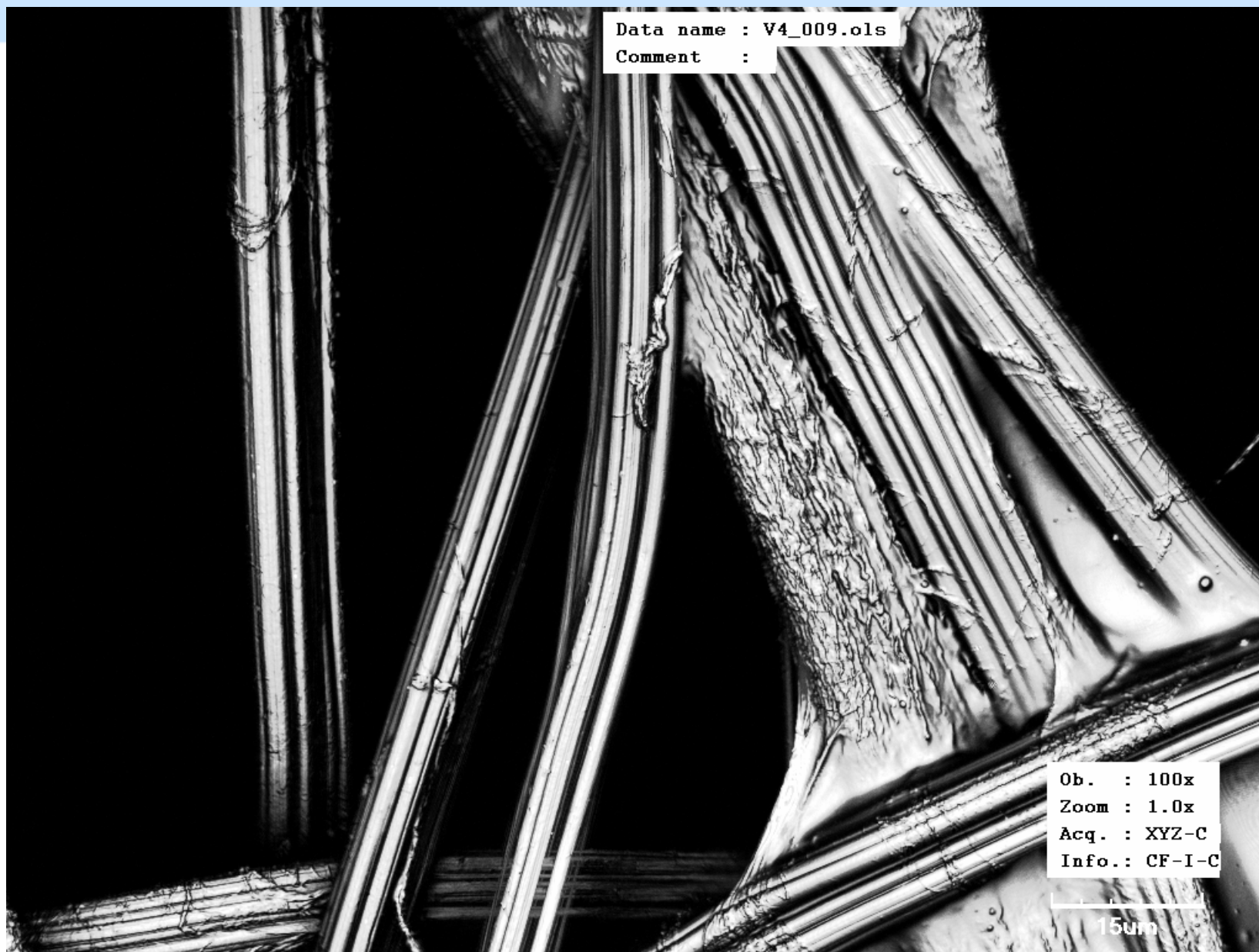
NEW

Data name : V4_012.ols
Comment :

Ob. : 20x
Zoom : -
Acq. : XY-C
Info.: BF

80um





Data name : V4_013.ols
Comment :

Ob. : 100x
Zoom : 6.0x
Acq. : XYZ
Info.: CF-I-C

2um

Co jsme zjistili o uhlíkových tečkách?

Na vláknech vytváří CQD charakteristické shluky („kůra“).

Při nanesení CQD na sklo se vytváří shluky široké $\approx 1\mu\text{m}$ a vysoké $\approx 30\text{ nm}$.

Mají žluto-hnědou barvu.

Pro viditelnou luminiscenci stačí výkon 0.1 mW na vlnové délce 400 nm.

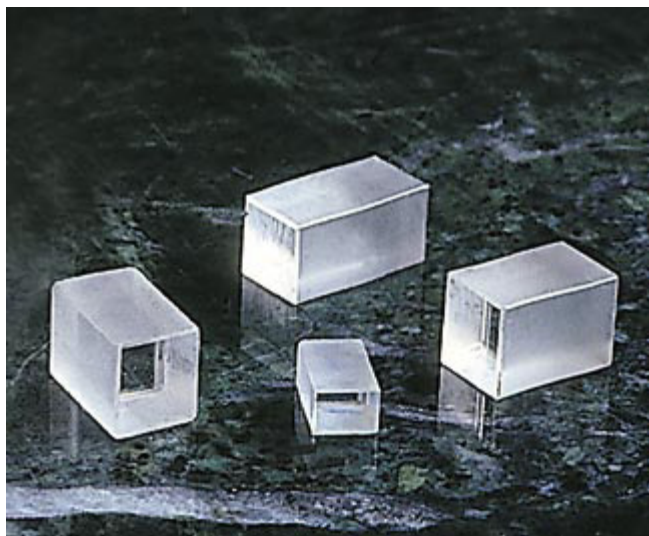
Řeší se použitelnost CQD v bioaplikacích.

Reference:

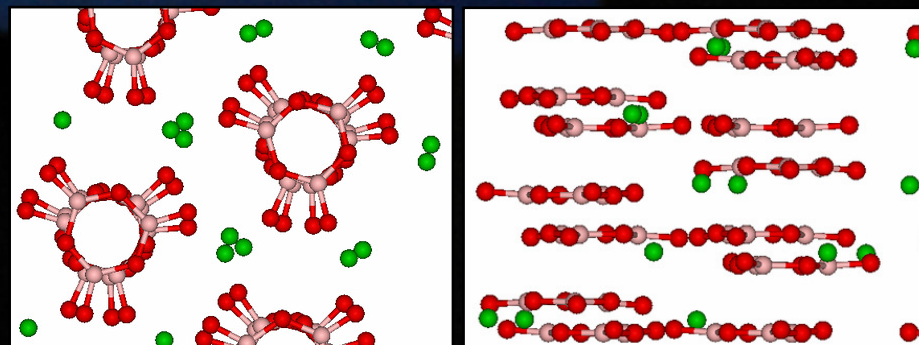
S.N. Baker a G.A. Baker, *Luminescent Carbon Nanodots: Emergent Nanolights*, Angewandte Chemie International Edition 49 (38), 6726–6744 (2010).

S.Qu, *et.al.*, *A Biocompatible Fluorescent Ink Based on Water-Soluble Luminescent Carbon Nanodots*, Angewandte Chemie International Edition 51, 1–5, (2012).

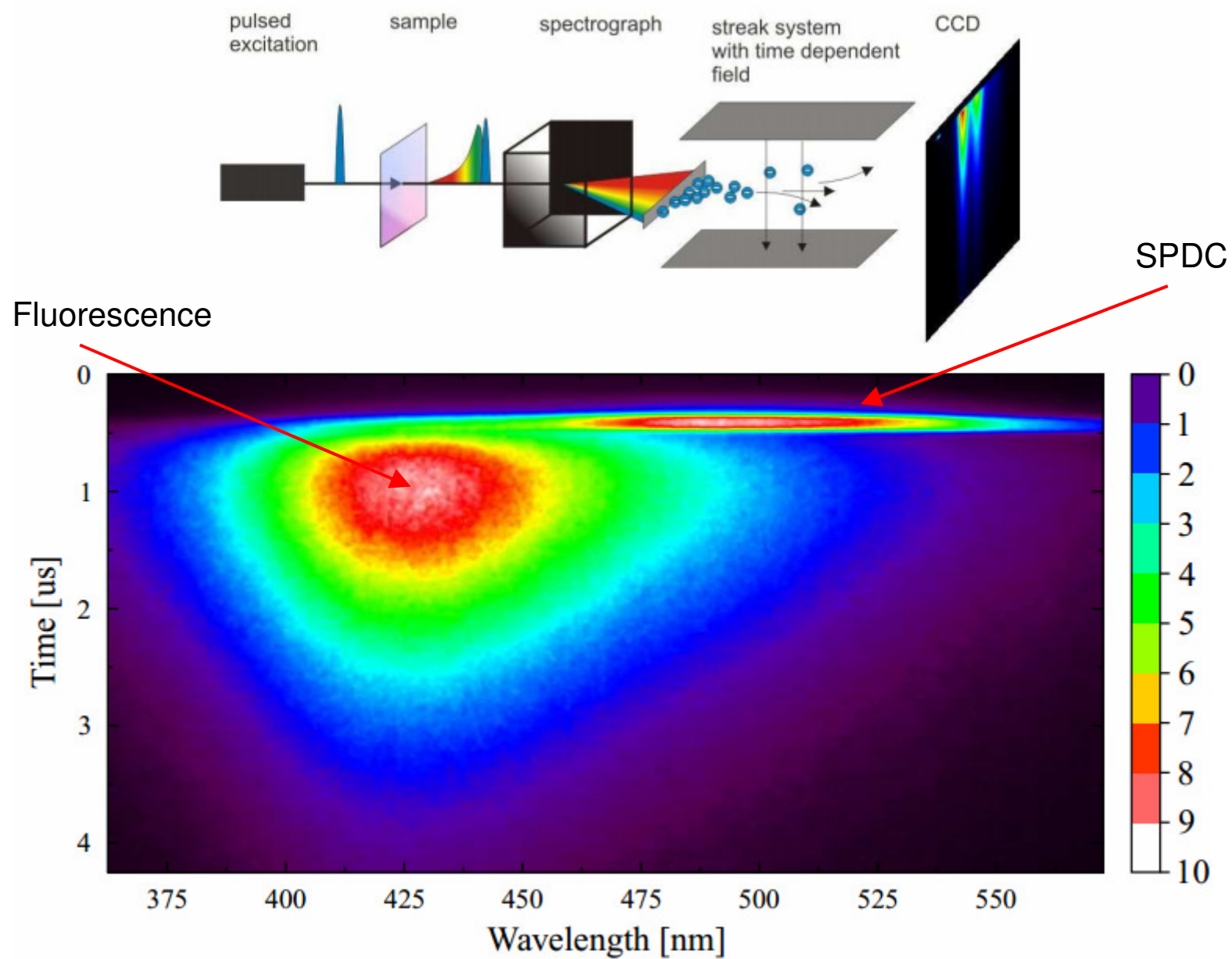
4. Fluorescence nelineárních krystalů



Při čerpání nelineárního krystalu $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$
na 267 nm je v signálu patrná fluorescence.

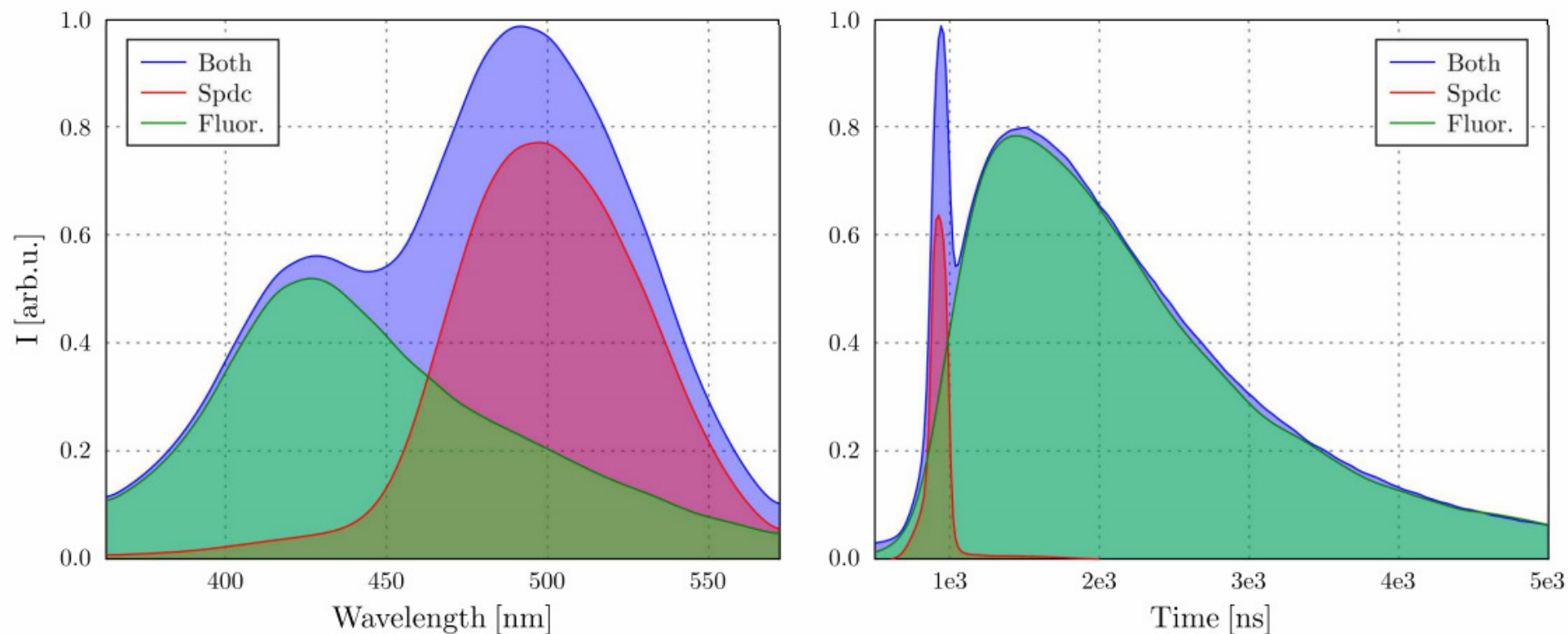


Měření sestupné konverze v BBO



Možnosti separace SPDC a fluorescence

Při čerpání nelineárního krystalu $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ na 267 nm je v signálu patrná fluorescence.



Fluorescence se dá odstranit pomocí:

- spektrální filtrace
- časového rozlišení
- polarizační filtrace
- volbou čerpání s delší vlnovou délkou (nad 300 nm)

DĚKUJI ZA POZORNOST

