



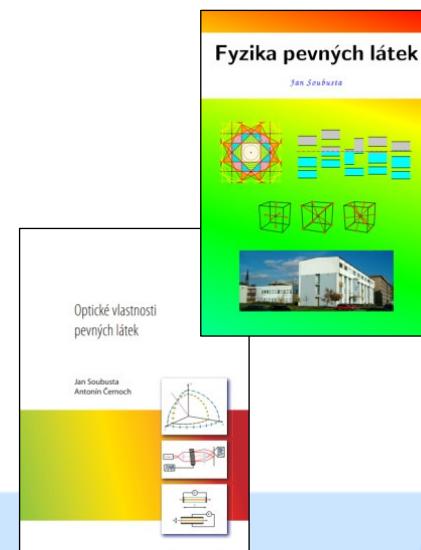
# Využití symetrie při popisu fyzikálních jevů

Jan Soubusta

říjen 2023

# Obsah

1. Symetrie pevných látek
2. Symetrie v nelineární optice
3. Symetrie SHG typu II v PP-KTP
4. Koherence vs. entanglement
5. GHZ stavy – nelokální podíl
6. Hierarchie kvantové provázanosti
7. Pedagogické aktivity
8. Další činnost
9. Přehled vědeckých výsledků



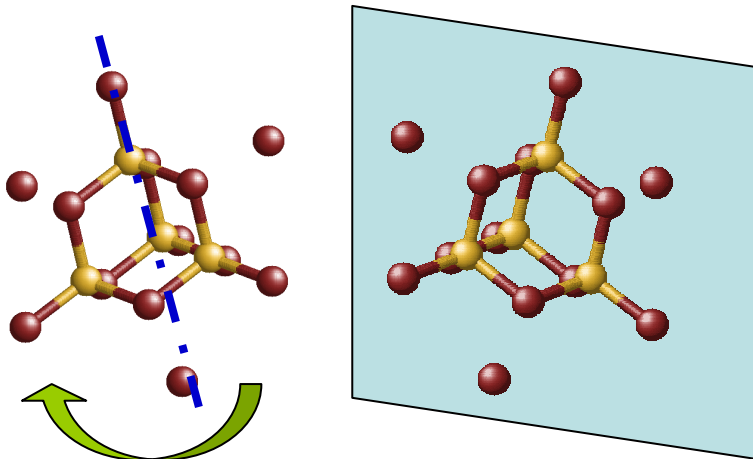
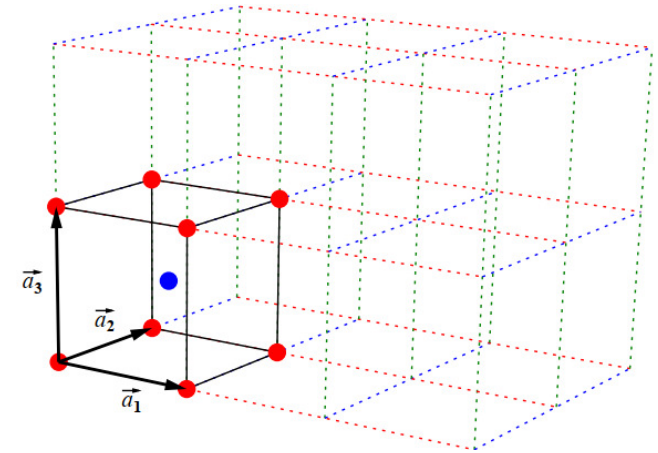
# 1. Symetrie pevných látek

**Krystal** = periodické uspořádání atomů v pevné látce,  
invariantní vůči operacím symetrie

symetrie vůči operaci translace

grupa bodové symetrie

operace: rotace, zrcadlení,  
nevlastní rotace, inverze, identita



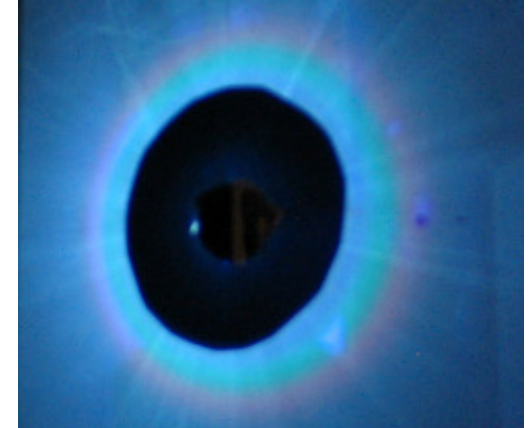
sfalerit – GaAs, diamant



Pevné látky jsou ideální pro výuku kvantové mechaniky.

# 2. Symetrie v nelineární optice

95% NL optiky se věnuje generaci druhé harmonické – SHG  
a sestupné konverzi – SPDC



NL procesy 2. řádu

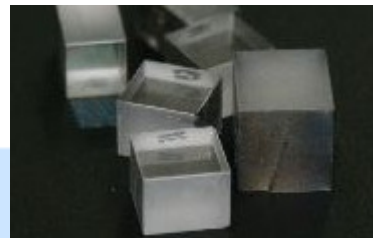
$$P_i^{\text{NL}} = \varepsilon_0 \chi_{ijk}^{(2)} E_j E_k$$

vlnová rovnice:

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

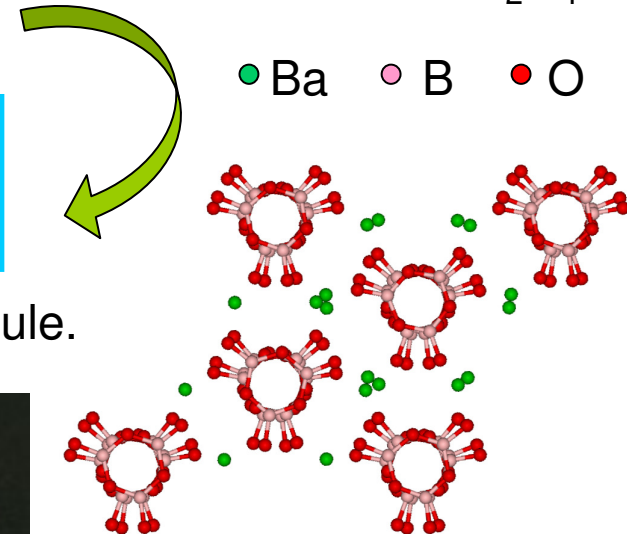
**Symetrie:** u krystalů s operací **inverze** je  $\chi^{(2)}$  rovno nule.

nepoužitelný  $\alpha\text{-BaB}_2\text{O}_4$



BBO =  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$

● Ba    ● B    ● O



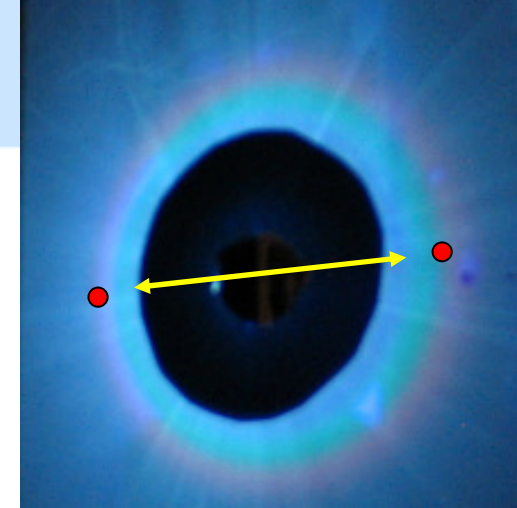
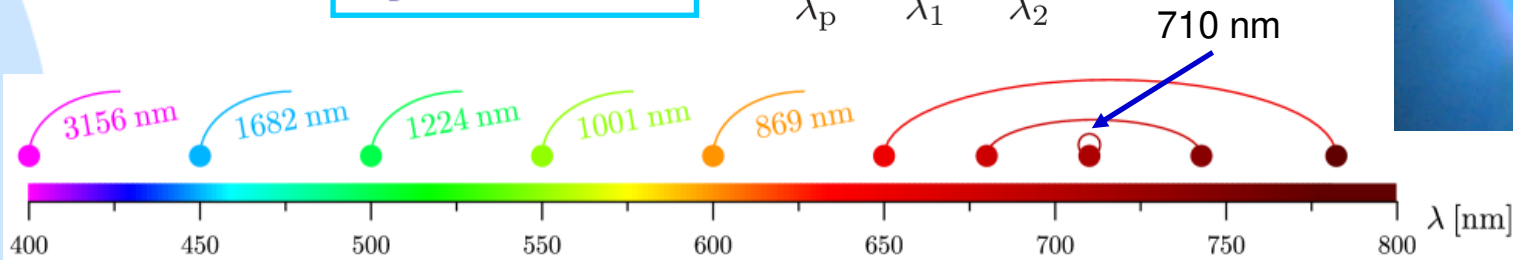
# Sestupná parametrická konverze

Zákony zachování na úrovni interakce fotonů

energie

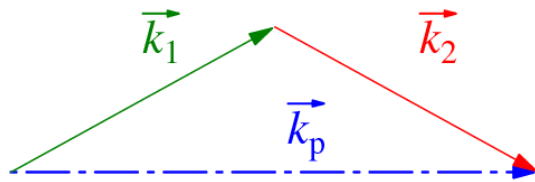
$$\omega_p = \omega_1 + \omega_2$$

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$



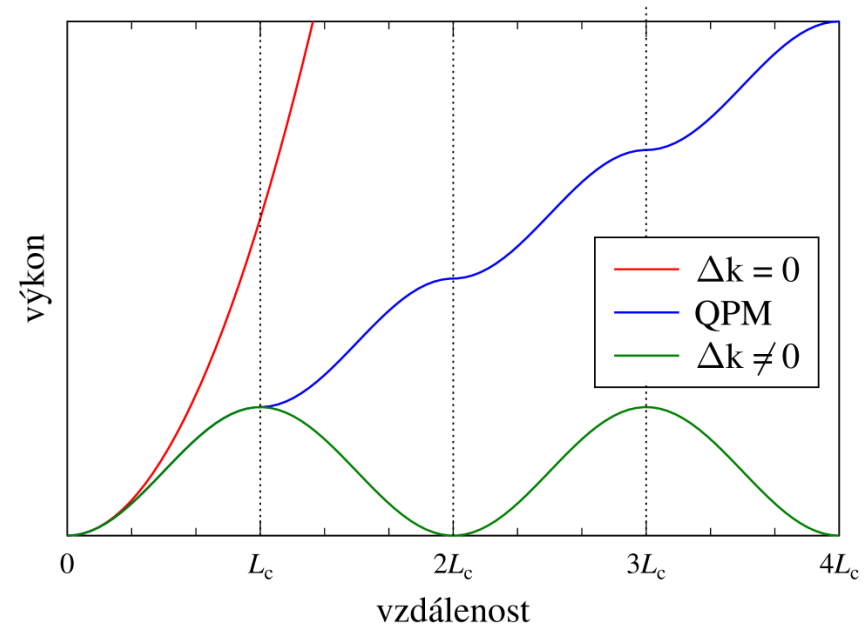
hybnost

$$\vec{k}_p = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$$

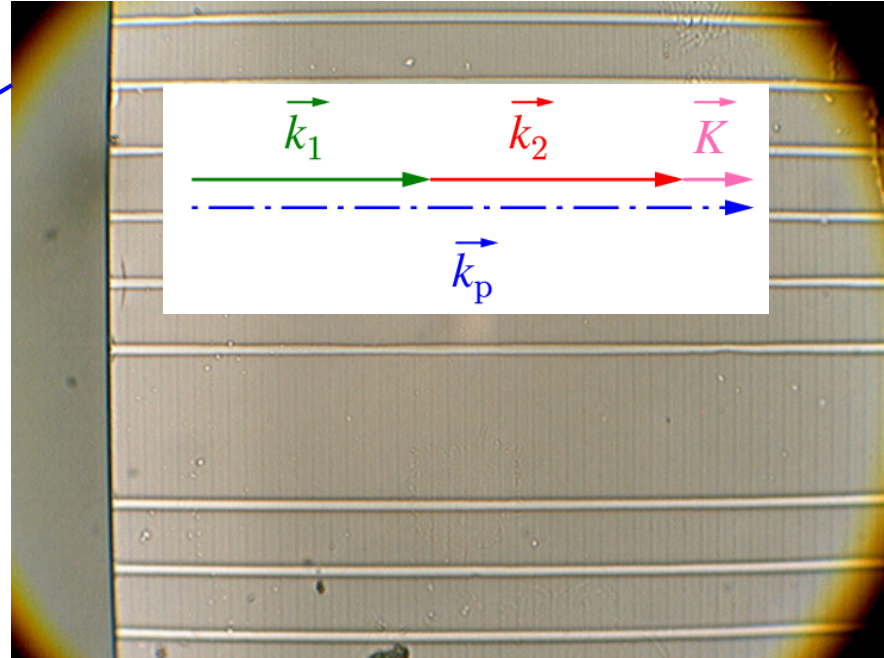
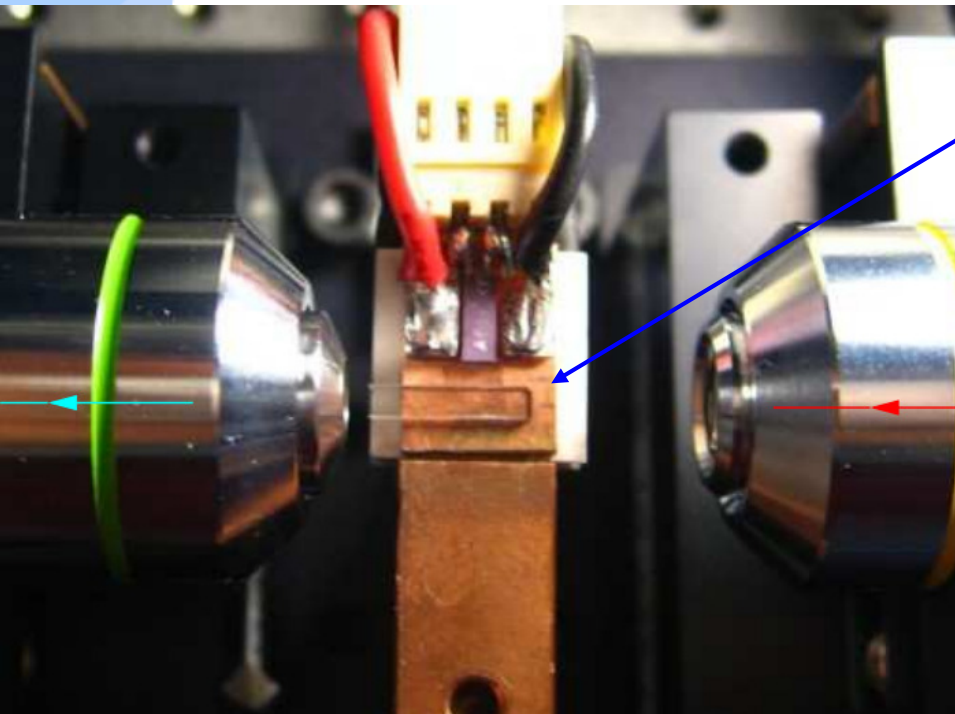


Podmínka fázové synchronizace:

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_p = \Delta\vec{k} = 0$$



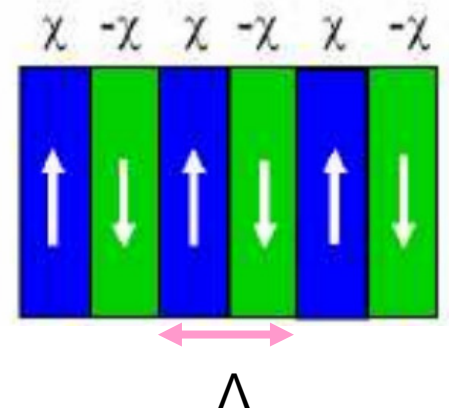
### 3. Symetrie SHG typu II v PP-KTP



translační symetrie PP-KTP

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

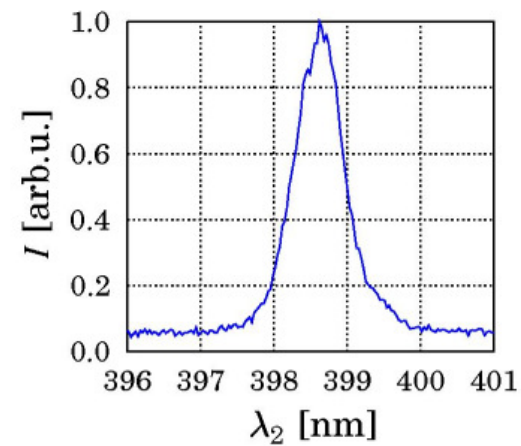
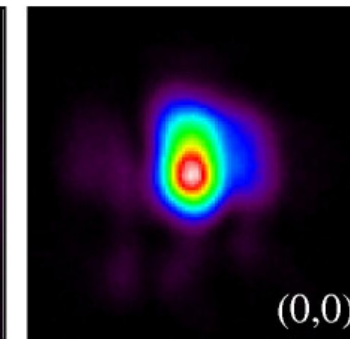
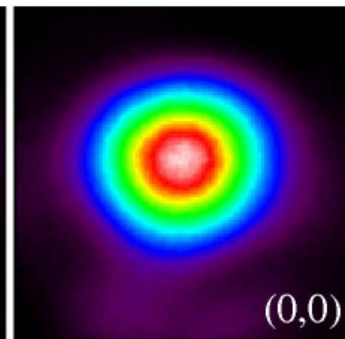
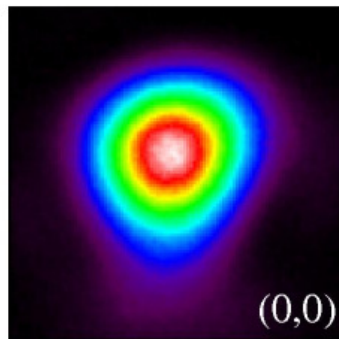
KTiOPO<sub>4</sub>



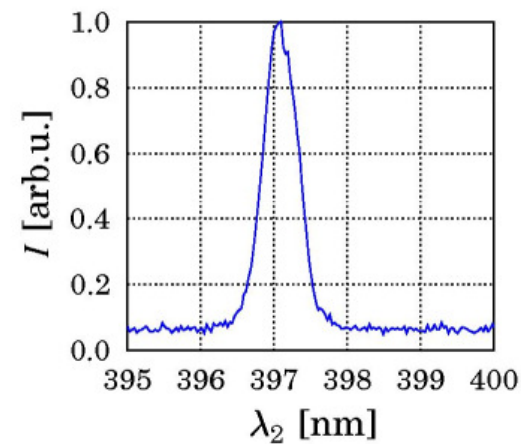
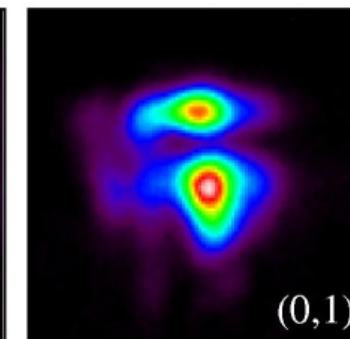
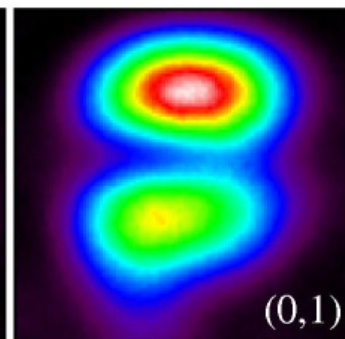
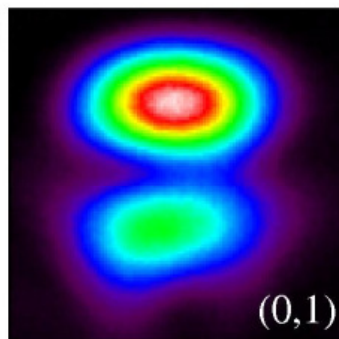


TE  $\lambda_1$ TM  $\lambda_1$ TE  $\lambda_2$ 

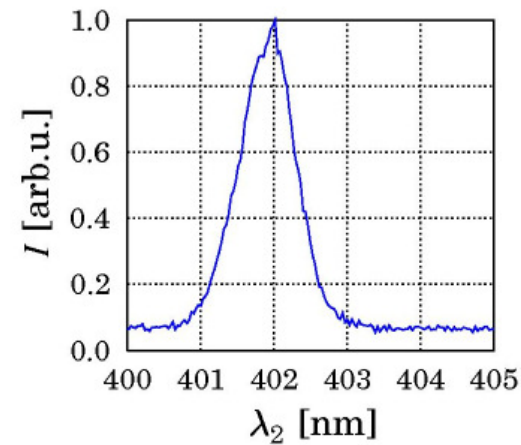
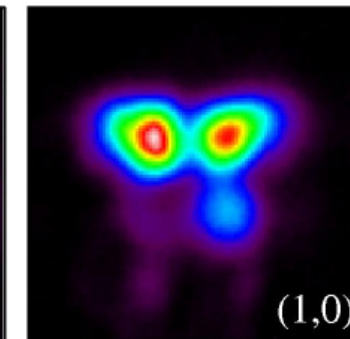
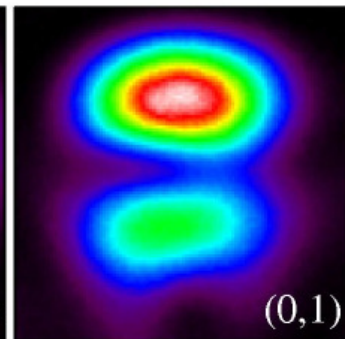
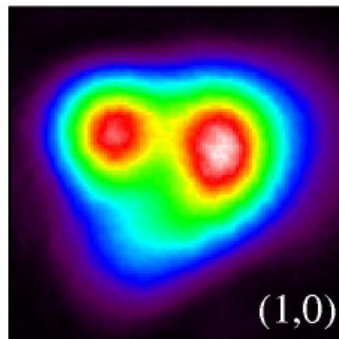
a)



b)



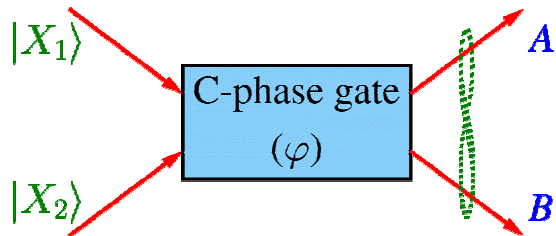
c)



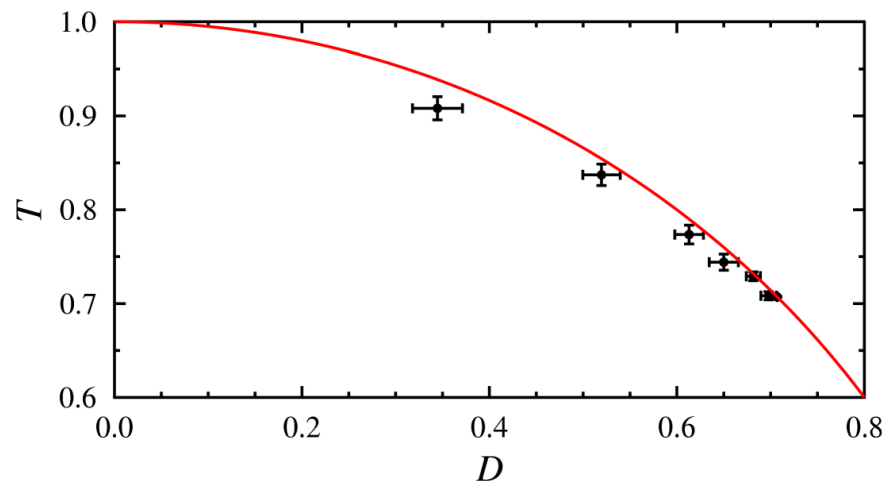
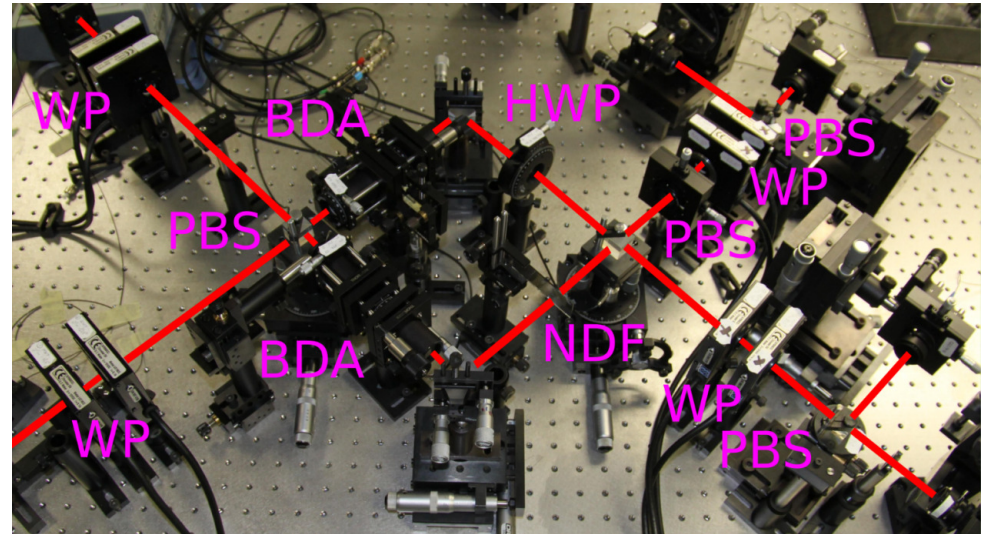
# 4. Koherence vs. entanglement

Studium využití koherence pro generaci korelací na dvou příkladech

## A) lineární optika: C-phase



$$|X\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}$$

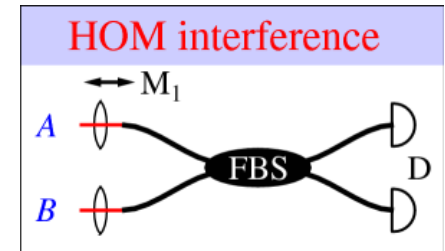
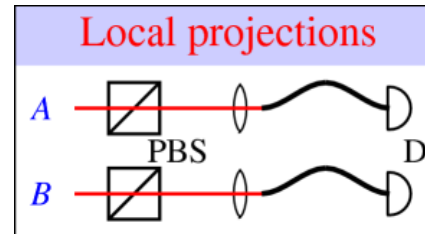
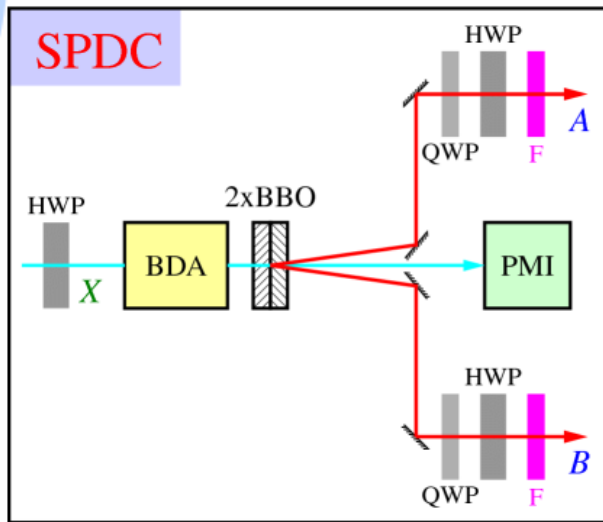


$$S^2 = D^2 + T^2$$

koherence  $\nearrow$   $D^2$   $\nwarrow$  entanglement  $T^2$

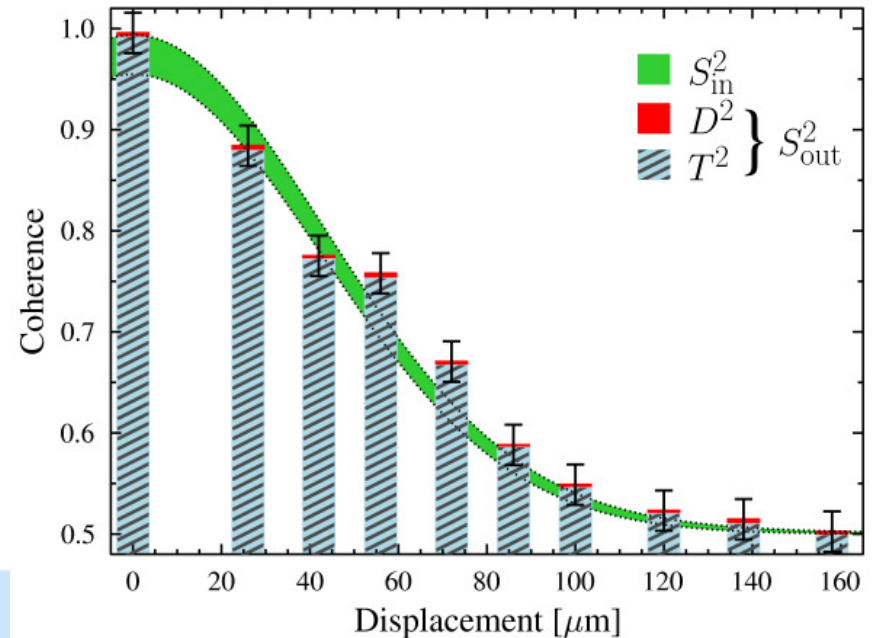
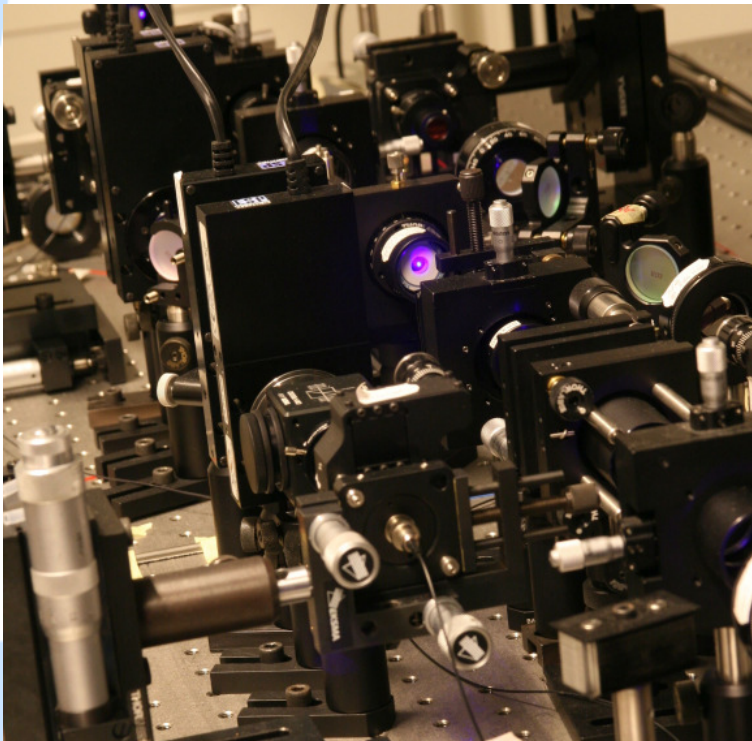


## B) nelineární optika: Sestupná parametrická konverze



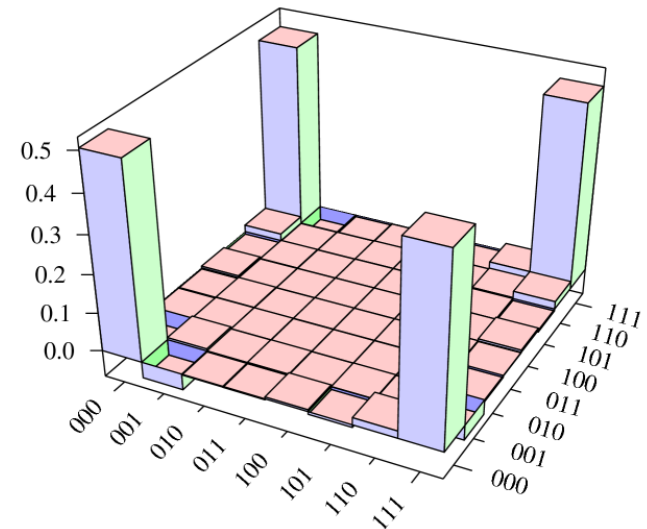
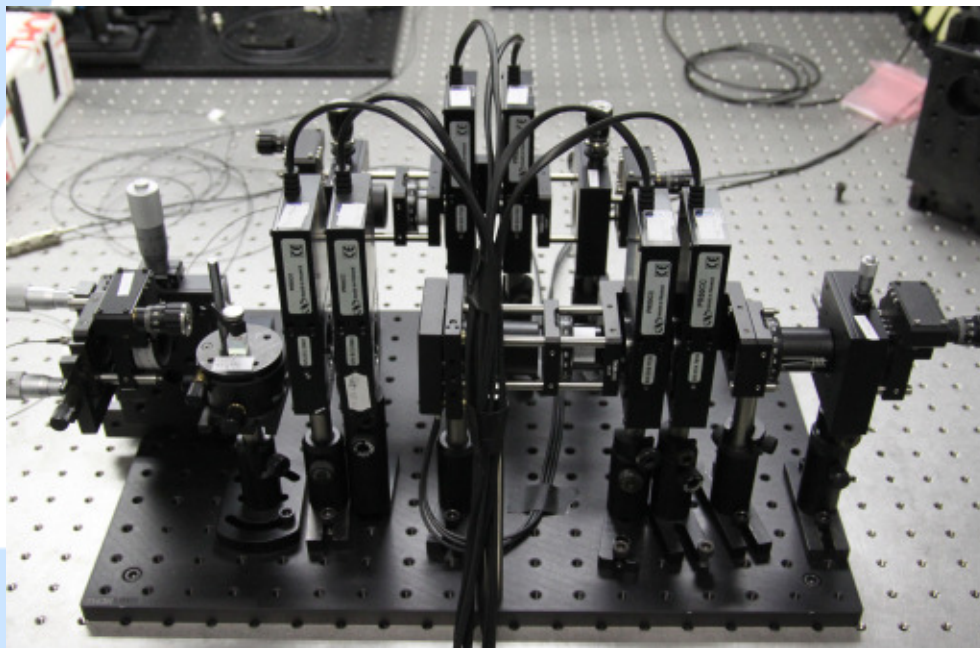
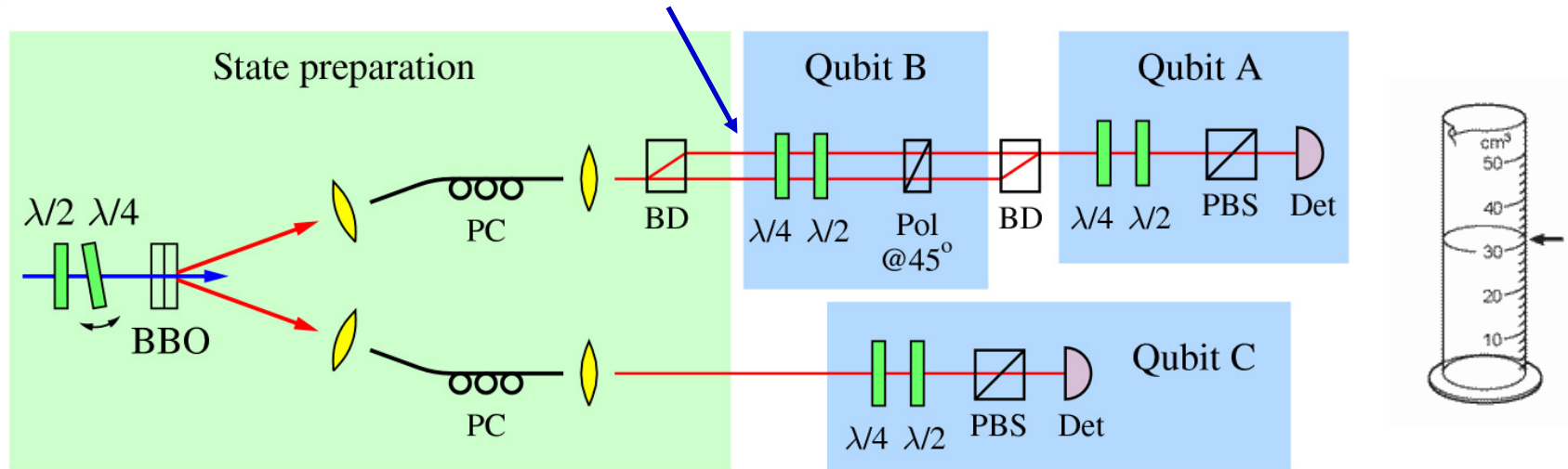
$$S_{\text{in}}^2 = \text{Tr}[\hat{\rho}_{\text{pump}}^2] = (1 + V^2)/2.$$

$$T = \left( \frac{B_{\text{max}}}{2\sqrt{2}} \right)$$



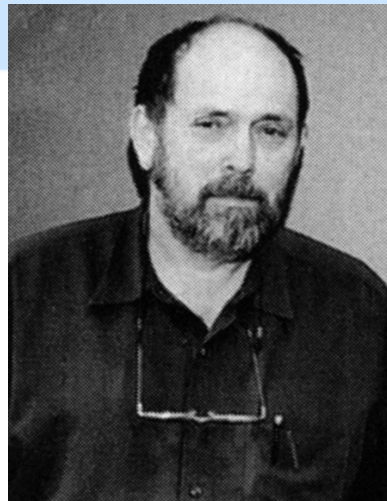
# 5. GHZ stavy – nelokální podíl

$$|gGHZ\rangle = \cos(\theta)|000\rangle + \sin(\theta)|111\rangle, \quad \theta \in \langle 0, \pi/4 \rangle.$$

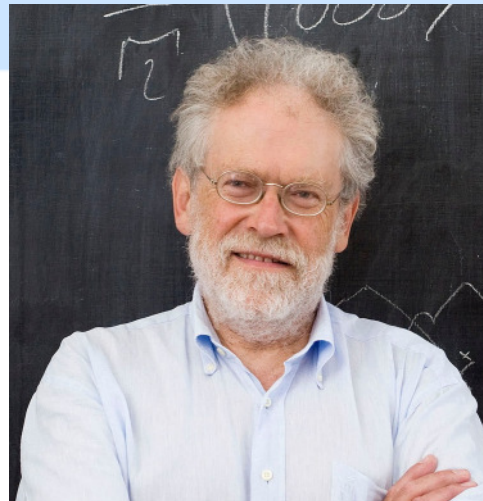




Daniel Greenberger



Michael Horne



Anton Zeilinger



George Svetlichny

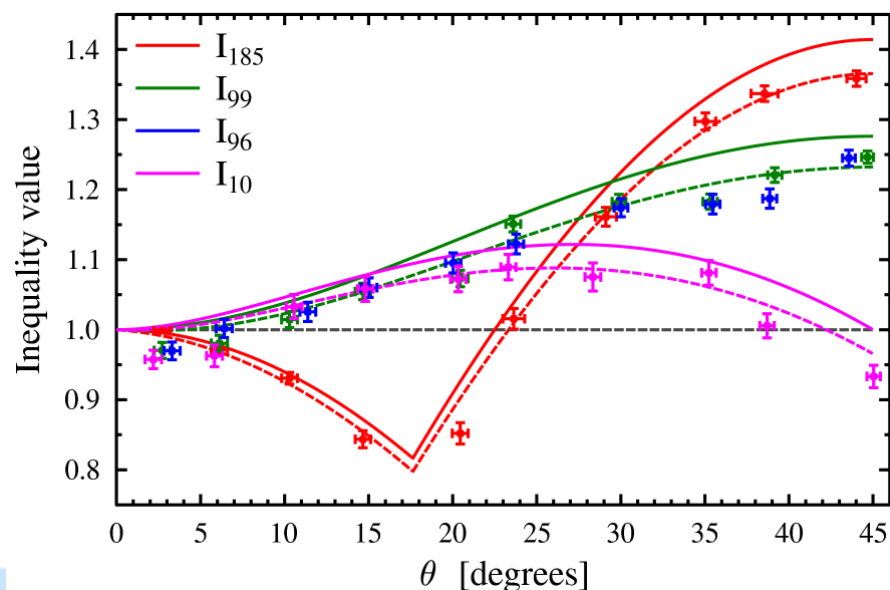
**gGHZ = 3-qubitové stavy**

$$|gGHZ\rangle = \cos(\theta)|000\rangle + \sin(\theta)|111\rangle,$$

$$\theta \in \langle 0, \pi/4 \rangle.$$

185 nerovností Bellova typu  
pro 3-qubitové stavy.

Nelokálnost:  $|\text{Ineq}| > 1$





# 6. Hierarchie kvantové provázanosti

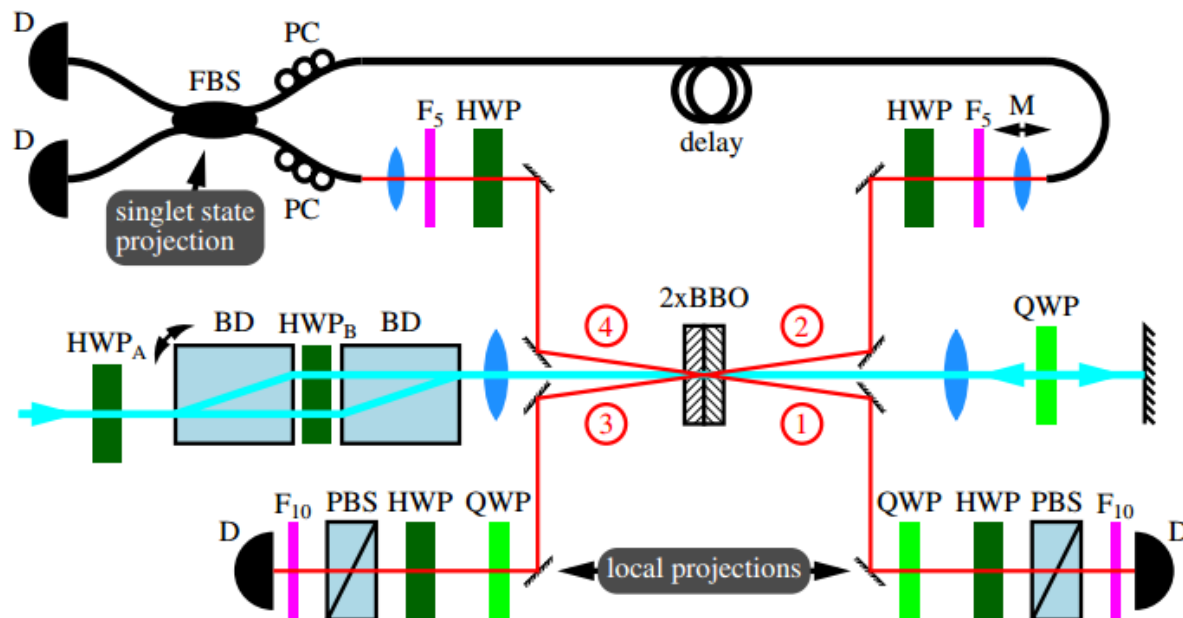
zobecněné Wernerovy stavy:

$$\rho_{\text{GW}} = p|\psi_q\rangle\langle\psi_q| + \frac{1-p}{4}I_4,$$

$$|\psi_q\rangle = \sqrt{q}|HV\rangle - \sqrt{1-q}|VH\rangle.$$

korelační matice:

$$R[\rho_{\text{GW}}(p, q)] = \begin{pmatrix} 4p^2q(1-q) & 0 & 0 \\ 0 & 4p^2q(1-q) & 0 \\ 0 & 0 & p^2 \end{pmatrix}.$$



nelokální

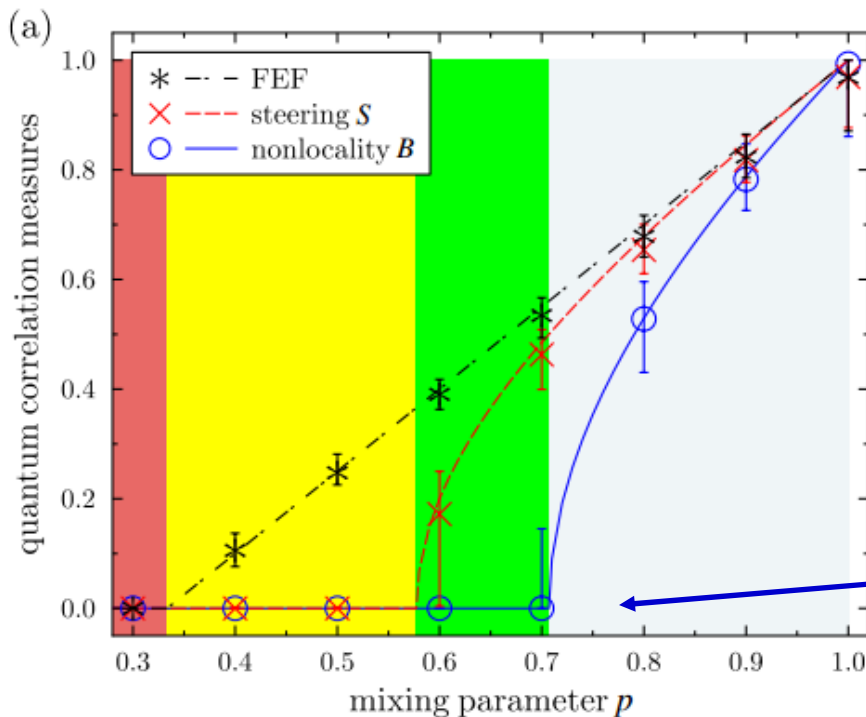
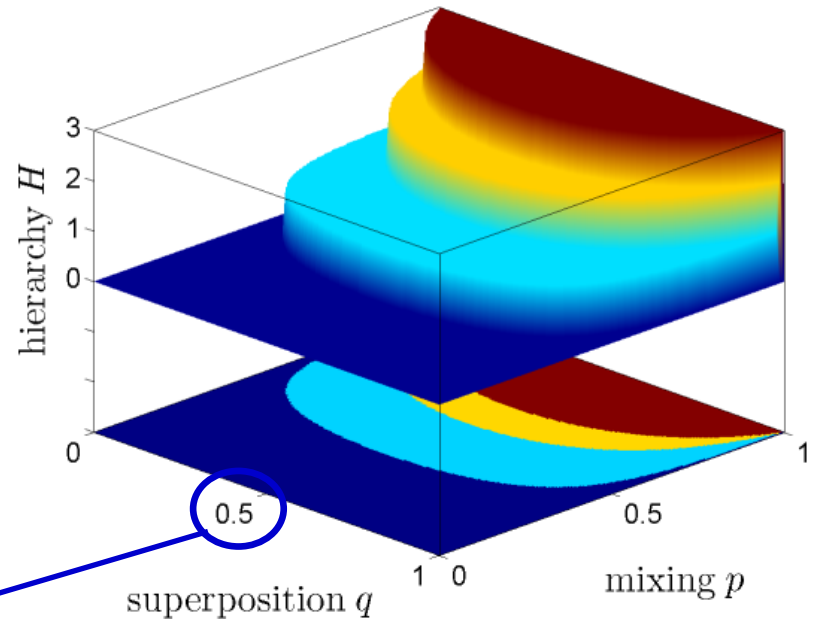
$$B(\rho) = \sqrt{\theta\{\text{Tr}R - \min[\text{eig}(R)] - 1\}}$$

řiditelný - steerable

$$S(\rho) = \sqrt{\theta\{\text{Tr}R - 1\}}/2$$

full entangled fraction

$$\text{FEF}(\rho) = \theta\{\text{Tr}\sqrt{R} - 1\}/2$$



$$\rho_{\text{GW}} = p|\psi_q\rangle\langle\psi_q| + \frac{1-p}{4}I_4,$$

$$|\psi_q\rangle = \sqrt{q}|HV\rangle - \sqrt{1-q}|VH\rangle.$$

hranice:

$$\frac{1}{3}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{2}}.$$



# 7. Pedagogické aktivit

výuka na PřF UP – garant předmětů

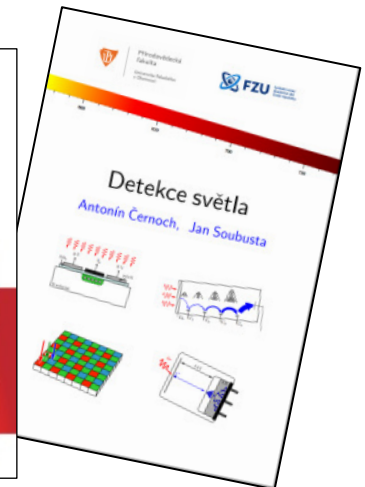
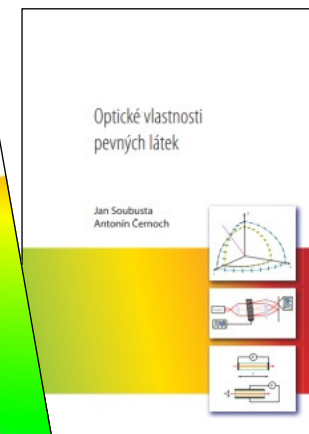
SLO/FPLX – Fyzika pevných látek (ZS, 4 hodiny)

SLO/EAFX – Experimentální aplikovaná fyzika (ZS, 5 hodiny)

SLO/OVPLX – Optické vlastnosti pevných látek (LS, 3 hodiny)

SLO/UFPL – Úvod do fyziky pevných látek (LS, 2 hodiny)

SLO/NNE – Nanofotonika a nanoelektronika (LS, 2 hodiny)



# Vedení kvalifikačních prací

| vedení studentů DSP | obhájeno         |
|---------------------|------------------|
| Karel Lemr ml.      | 31.5. 2012       |
| Radek Machulka      | 9.9. 2015        |
| Eva Halenková       | ukončila studium |

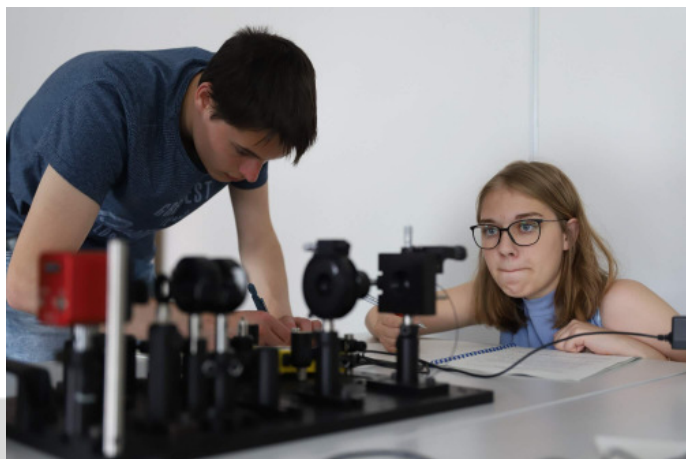
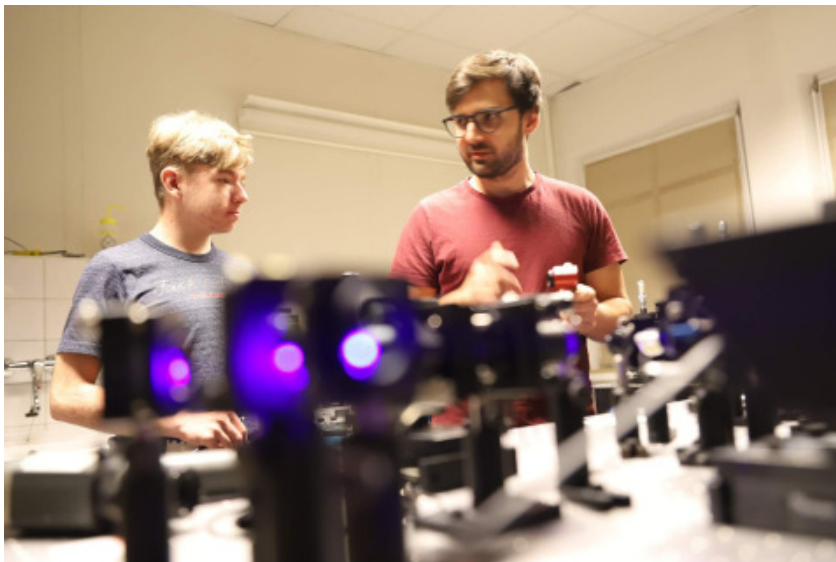
| vedení studentů nižšího stupně |      | obhájeno   |
|--------------------------------|------|------------|
| Radek Machulka                 | Bc.  | 27.6. 2006 |
| Jan Dzian                      | Bc.  | 14.6. 2018 |
| Radek Machulka                 | Mgr. | 20.5. 2008 |
| Eva Halenková                  | Mgr. | 17.6. 2010 |
| Jan Dzian                      | Mgr. | 22.6. 2021 |
| Jakub Dvořák                   | Mgr. | 6.6. 2023  |
| Martin Zeman                   | Mgr. | studuje    |



# Letní škola optiky



2013 – 2019 ve spolupráci s prof. Maria Bondani,  
z University Insubria, Como



# 8. Další činnosti

Univerzita Palackého – Přírodovědecká fakulta

Výuka v programech **Aplikovaná fyzika** a **Nanotechnologie**

Od 2018 garant Bc. programu **Přístrojová počítačová fyzika**

Od 2022 předseda VPRO Fyzika

Univerzita Palackého – mezioborově

člen OR **DSP** Dějiny umění, památková péče a technologie  
pro materiálové průzkumy

Spolupráce s jinými vysokými školami

člen komisí pro obhajoby a SZZ na **ČVUT**, **VŠB-TUO**, **MU Brno**

GAČR

2017-20 člen/místopředseda panelu **P205**



# Projekty a mezinárodní spolupráce

## hlavní řešitel

IAA100100713 (GA AVČR) Generace a charakterizace kvantově provázaných fotonových párů v moderních nelineárních strukturách (2007-2011).

## člen týmu

|                  |                                                |
|------------------|------------------------------------------------|
| 1 projekt NBÚ ČR | kvantová kryptografie                          |
| 3 projekty MŠMT  | výzkumná centra                                |
| 1 projekt COST   | fotonické krystaly                             |
| 4 projekty OPVK  | moderní technologie ve studiu, excelentní týmy |
| 5 projektů GAČR  | kvantová informatika, zdroje stavů, hradla     |

## 1 EU projekt - člen týmu

Digital Europe Programme, Call: DIGITAL-2021-QCI-01,

Projekt: 101091684 – CZQCI (2022-2026)

Czech National Quantum Communication Infrastructure

## spolupráce

prof. Karol Bartkiewicz, Adam Mickiewicz University (Poland)

prof. Adam Miranowicz, RIKEN (Japan)

dr. Artur Barasinski, University of Wroclaw (Poland)

prof. Paweł Horodecki, Nat. Quant. Inf. Cent. in Gdansk (Poland)

prof. Maria Bondani, dr. Alessia Allevi, University of Insubria, Como (Italy)

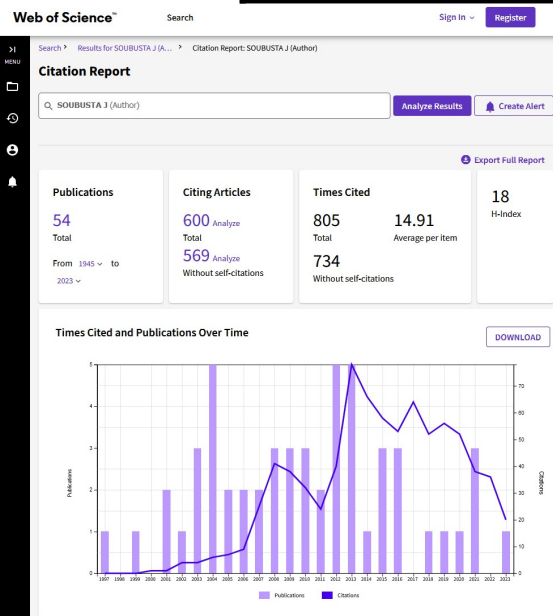
prof. Christine Silberhorn, Max Planck Institut, Erlangen (Germany)

prof. Thomas Jennewein, University of Waterloo (Canada)

prof. Jens Eisert, Freie Universität Berlin (Germany)

# 9. Přehled vědeckých výsledků

|                                            |          |
|--------------------------------------------|----------|
| počet impaktovaných publikací              | 45       |
| první-korespondenční autor, poslední autor | 10, 19   |
| počet dalších recenzovaných publikací      | 11       |
| počet knih                                 | 3        |
| celkový počet citací, bez autocitací       | 805, 734 |
| průměrný počet citací na článek            | 14.9     |
| H-index                                    | 18       |
| soustavná pedagogická práce na VŠ          | 20 let   |



## scientific reports

www.nature.com/scientificreports

Check for updates

### OPEN Experimental hierarchy of two-qubit quantum correlations without state tomography

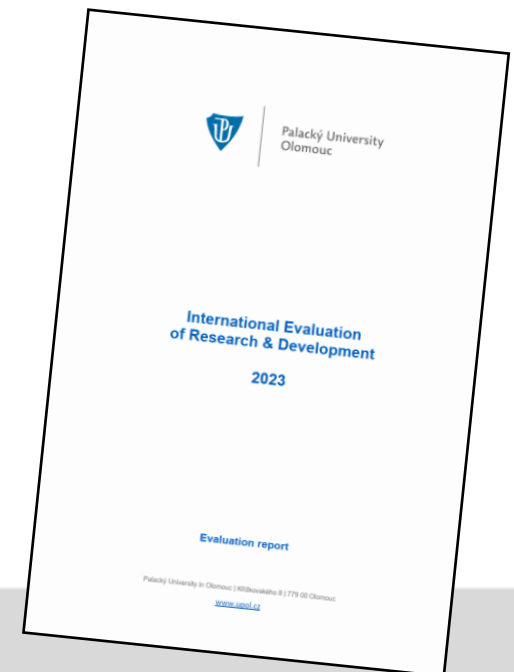
Shilan Abo<sup>1</sup>, Jan Soubusta<sup>2</sup>, Kateřina Jiráková<sup>2</sup>, Karol Bartkiewicz<sup>1,2</sup>, Antonín Černoč<sup>3</sup>, Karel Lemr<sup>2</sup> & Adam Miranowicz<sup>1</sup>

A Werner state, which is the singlet Bell state affected by white noise, is a prototype example of states, which can reveal a hierarchy of quantum entanglement, steering, and Bell nonlocality by controlling the amount of noise. However, experimental demonstrations of this hierarchy in a sufficient and necessary way (i.e., by applying measures or universal witnesses of these quantum correlations) have been mainly based on full quantum state tomography, corresponding to measuring at least 15 real parameters of two-qubit states. Here we report an experimental demonstration of this hierarchy by measuring only six elements of a correlation matrix depending on linear combinations of two-qubit Stokes parameters. We show that our experimental setup can also reveal the hierarchy of these quantum correlations of generalized Werner states, which are any two-qubit pure states affected by white noise.

# Vize do budoucna

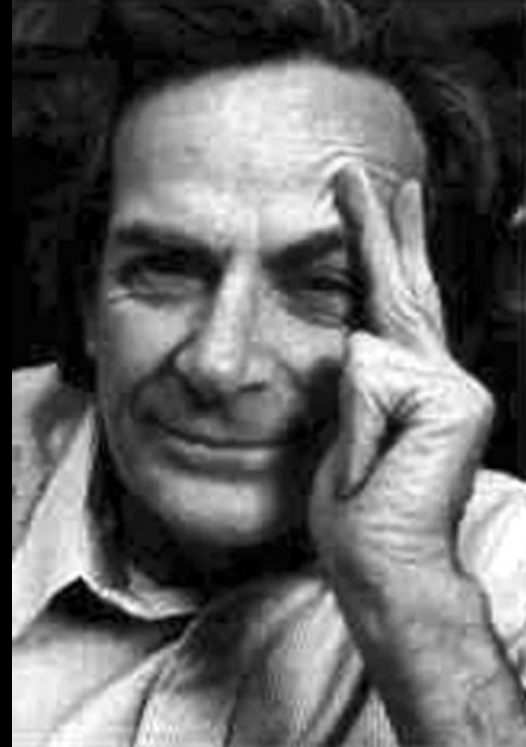
- Intenzivní propagaci celého oboru fyzika. **Zatraktivnění fyziky** mezi potenciálními uchazeči o studium.
- Posílit snahy o získávání **mezinárodních projektů** a spolupráce se zahraničními partnery.
- Zajištění **kvalitní výuky**, která studentům poskytuje širší náhled na celý obor.
- Rozvíjení **tradičních i nových směrů** ve vědě a zapojení studentů do vědecké práce nejen v rámci kvalifikačních prací.

Podobná doporučení nám poskytla  
i evaluační komise pro obor Fyzika



Fyzikální zákony platí i tam,  
kam jsme se ještě nedívali.

Richard Feynman



Děkuji za pozornost