



**PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE**
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



**EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Projekt podpořený Operačním programem Přeshraniční spolupráce Slovenská republika - Česká republika 2007-2013



**TRENČIANSKY
SAMOSPRÁVNÝ
K * R * A * J**



Hvezdáreň v Partizánskom
Hvězdárna Valašské Meziříčí



Tato akce je realizována s finanční
výpomocí Zlínského kraje



**REGIONAL CENTRE
OF ADVANCED TECHNOLOGIES
AND MATERIALS**

Regionální centrum pokročilých technologií a materiálů



EXPERIMENTY S JEDNOTLIVÝMI FOTONY

Ondřej Haderka

*Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR,
Regionální centrum pokročilých technologií a materiálů,
Univerzita Palackého v Olomouci*

***Workshop „Význam experimentu a praktických úloh
ve vzdělávání“ Valašské Meziříčí, 23.-24.3.2012***



Obsah



- Co jsou fotony?
- Vlastnosti fotonů
- Jak je detekovat?
- Kvantové projevy duality fotonů
- Kvantové optické komunikace
- ...o našem pracovišti...



Experimenty s fotony





Experimenty s fotony





Co jsou fotony?



Foton



- 1900 M. Planck – zákony vyzařování černého tělesa – záření musí být vyzařováno nebo absorbováno po konečných kvantech
- 1905 A. Einstein – záření může existovat jen v konečných množstvích energie (Lichtquant) [„photon“ pochází od G. Lewise (1926) - $\phi\omega\varsigma$]



Vlna nebo částice - historie



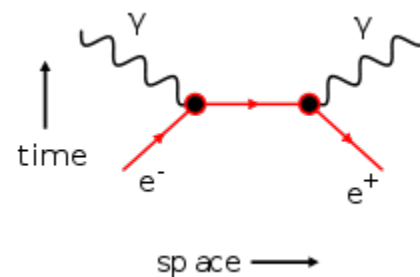
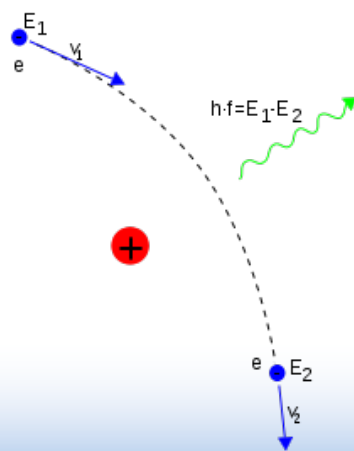
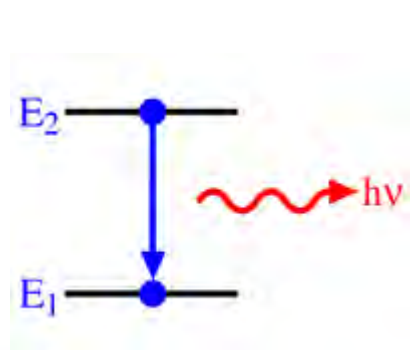
- částicové modely světla (Newton)
- lom, ohyb, dvojlom – vlnové teorie (Descartes 1637, Hooke 1665, Huygens 1678)
- poč. 19. stol – interference, difrakce (Young, Fresnel)
- 1865 – světlo je el.-mag. záření (Maxwell)
- 1888 – exp. potvrzeno (Hertz)
- energie světla závisí na frekvenci (chemické reakce, fotoelektrický jev)
- záření černého tělesa (Planck)
- 1905 (Einstein) - pro termodynamickou rovnováhu mezi látkou a el.-mag. polem musí být pole kvantováno
- 1916 (Einstein) – foton musí mít hybnost, navíc závislou na frekvenci (experiment 1923 - Compton)
- 70.-80. léta 20. stol. – korelační experimenty s fotony



Jak vznikají fotony?



- Energetické přechody na nižší hladiny v molekulách, atomech nebo jádrech
- Pohyb elektrického náboje se zrychlením – synchrotronové záření
- Anihilace částice s antičásticí



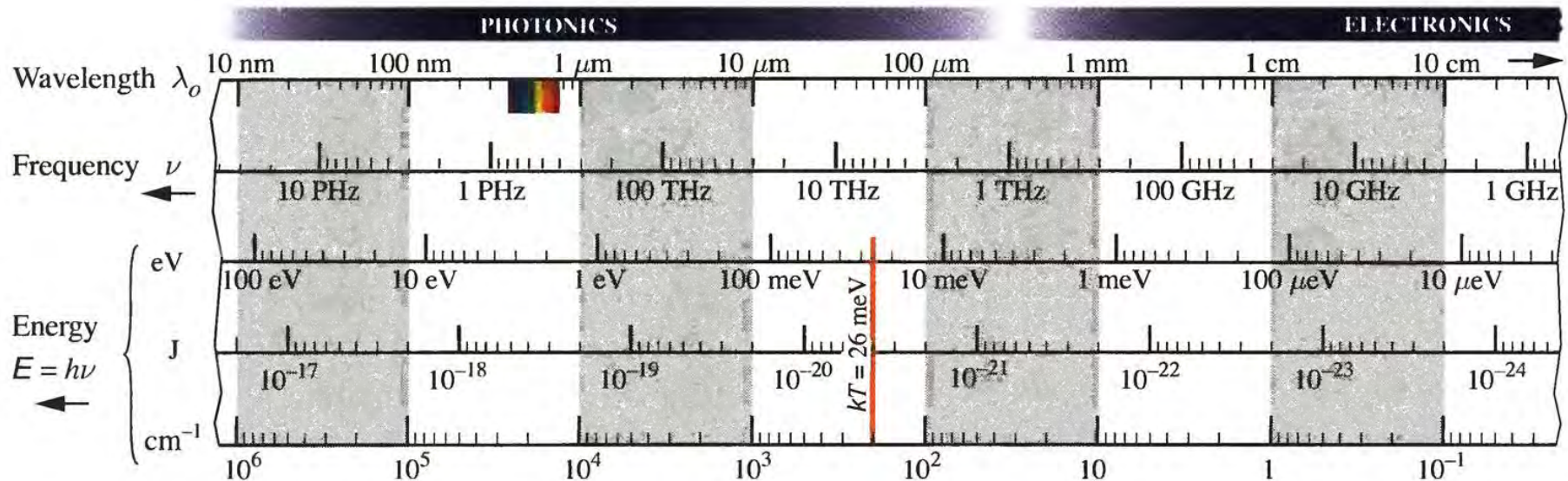


Foton – fyzikální vlastnosti



- nulová klidová hmotnost
- bez elektrického náboje
- stabilní částice (nerozpadá se)
- má dva polarizační stavy (a s tím související spin $\pm\hbar$)
- je popsán třemi komponentami vlnového vektoru (popisují jeho energii/vlnovou délku a směr šíření)
- $E = \hbar\omega = h\nu = hc/\lambda$, $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k} = h\mathbf{k}_0/\lambda$
 $k = |\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda = 2\pi\nu/c = \omega/c$

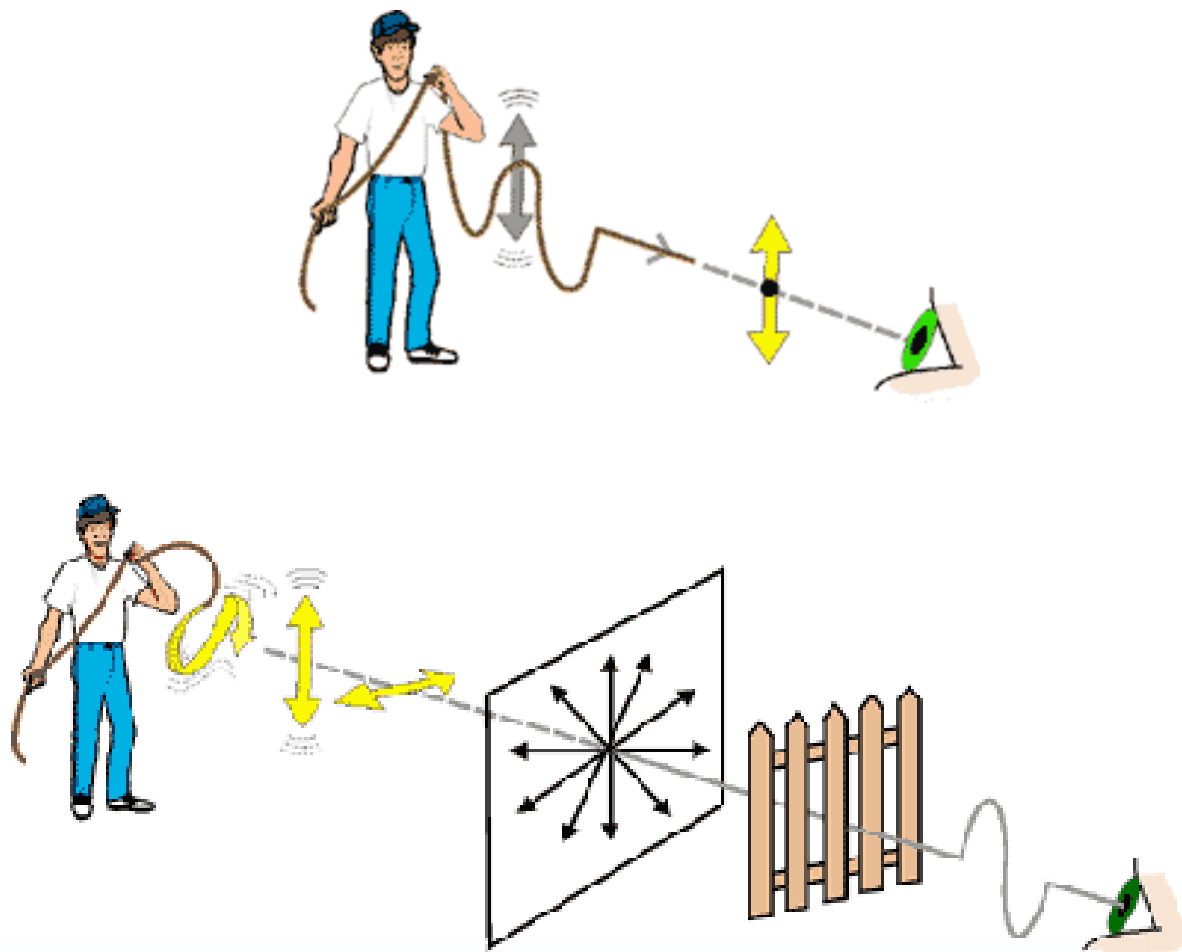
Jednotky „energie“



- vlnová délka, frekvence, energie, vlnočet, $\lambda\nu = c$
- Foton $\lambda = 1 \mu\text{m}$ má $\nu = 3 \times 10^{14} \text{ Hz}$
 $E = h\nu = 2 \times 10^{-19} \text{ J}$
- elektronvolt: 1,24 eV ($1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$)
- převrácený centimetr: 10^4 cm^{-1}
- μm , nm, angström
- GHz, THz, PHz, EHz
- Pro plyn v termodynamické rovnováze (černé těleso) $h\nu = kT$
 $\nu [\text{Hz}] \approx 2 \times 10^{10} T [\text{K}]$



Polarizace fotonu



Obrázky: © National Science Foundation, 2000



Detekce jednotlivých fotonů



Proč potřebujeme detekovat jednotlivé fotony?



- V klasické optice – každý foton je cenný (drahý) (např. v astronomii)
- V kvantové optice a kvantové informatice
 - ❑ časově-korelované čítání fotonů (TCPC)
 - ❑ některé problémy lze řešit lépe s jednotlivými fotony (QKD, QM)
 - ❑ některé úlohy vyžadují generaci a detekci jednotlivých fotonů (LOQC)
- Další aplikace v částicové fyzice, biomedicínském výzkumu, výzkumu vlastností atmosféry apod.



Hubbleovo velmi hluboké pole



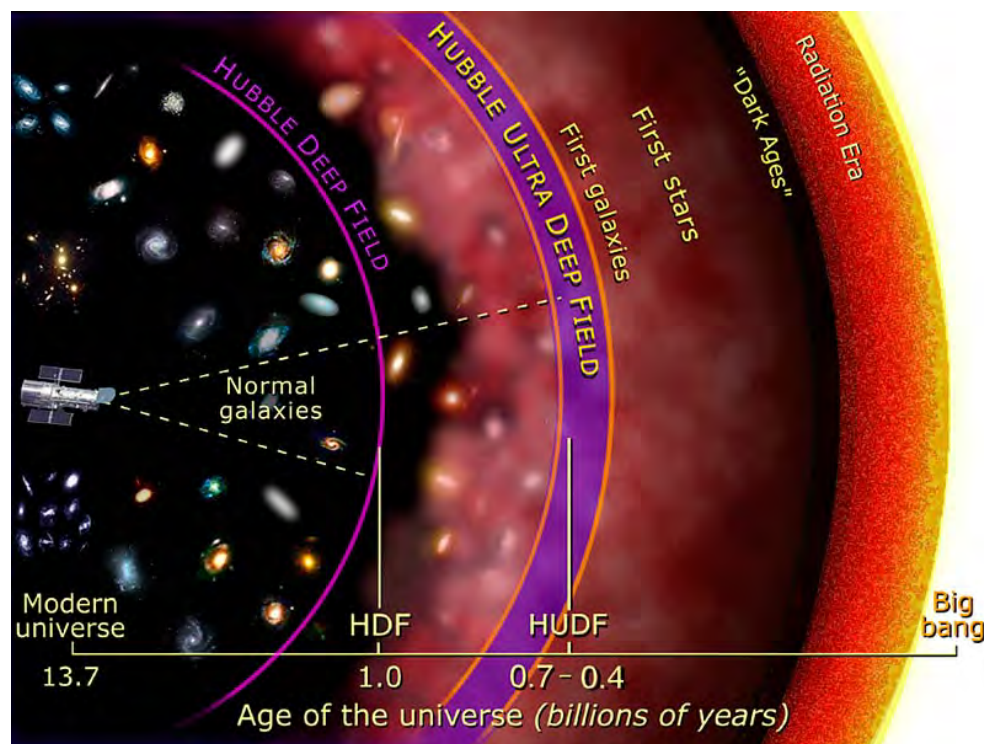
- Doposud nejhlubší pohled do vesmíru
- Oblast asi 1/10 průměru Měsíce bez jasných objektů (For)
- Asi 10.000 galaxií z doby jen 400-800 mil. let po velkém třesku
- Galaxií ve vesmíru je víc než hvězd v naší galaxii
- cca 1 foton za minutu





Hubbleovo velmi hluboké pole

- Doposud nejhlubší pohled do vesmíru
- Oblast asi 1/10 průměru Měsíce bez jasných objektů (For)
- Asi 10.000 galaxií z doby jen 400-800 mil. let po velkém třesku
- Galaxií ve vesmíru je víc než hvězd v naší galaxii
- cca 1 foton za minutu

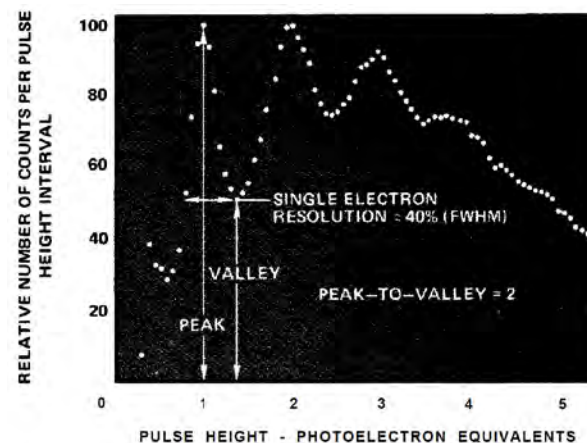
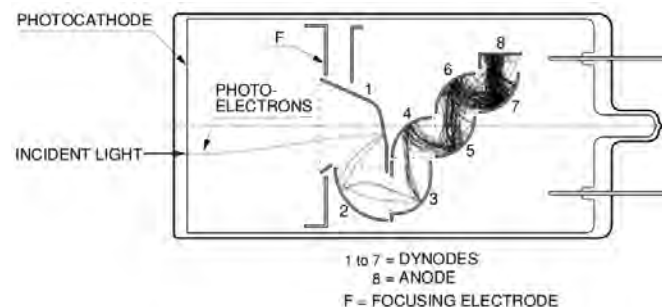




Fotonásobiče



- nejstarší detektor pro čítání fotonů (1949)
- velké aktivní plochy ($\varnothing > 10$ mm)
- zesilovací šum lze potlačit použitím první dynody z velkým zesílením (GaP)
- $\eta = 40\%$ @ 500 nm (GaAsP)
 $d \approx 100$ Hz, $\Delta t \approx 300$ ps
- $\eta = 2\%$ @ 1550 nm (InP/InGaAs @ 200 K),
 $d \approx 200$ kHz

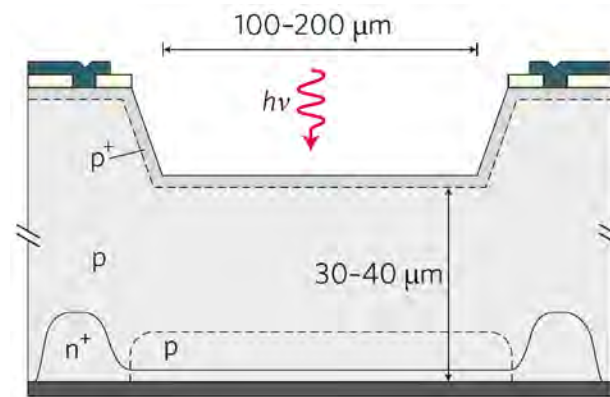




Jednofotonová lavinová fotodioda (SPAD)



- fotodioda se závěrným předpětím nad úrovní průrazu (Geigerův mód)
- lavinu zastaví zhášecí obvod
- Si: $\eta = 70\%$ @ 650 nm, $d \approx 25$ Hz, $\Delta t \approx 400$ ps, $\tau = 50$ ns, vysoký zesilovací šum
- back-flashing
- d může být sníženo až na 8×10^{-4} Hz chlazením na 78K
- mělké přechody: $\Delta t \approx 40$ ps
- InGaAs/InP: $\eta = 20\%$ @ 1550 nm, $d \approx 10$ kHz, $\Delta t \approx 400$ ps, $\tau = 10$ μ s, vysoký zesilovací šum, nutné hradlování

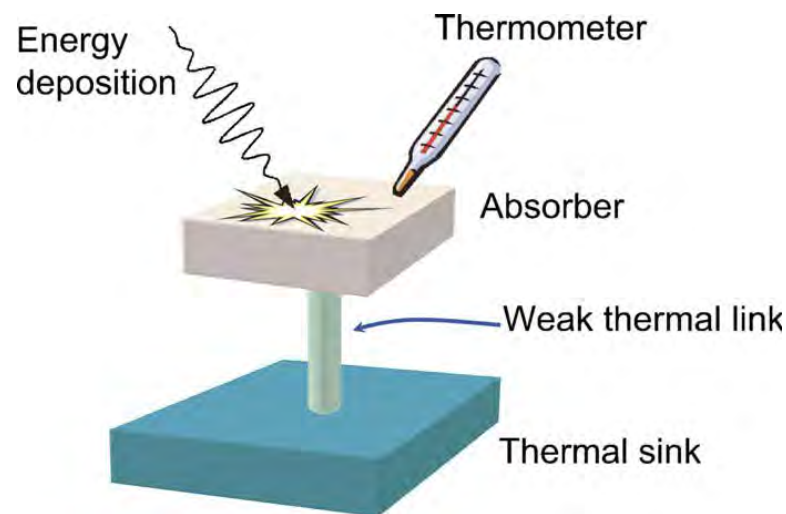




Transition-edge sensor



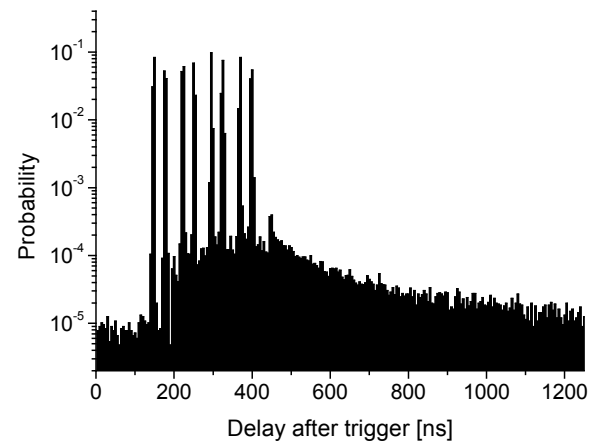
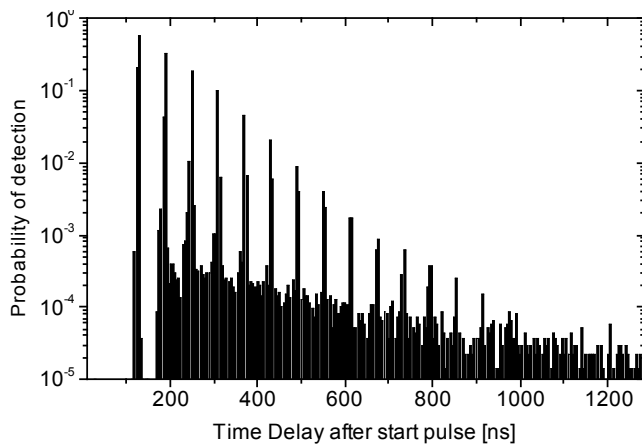
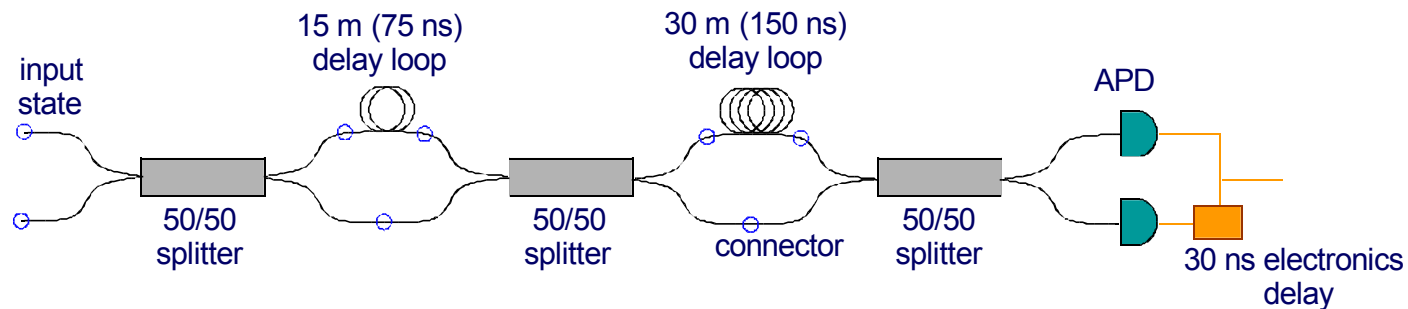
- supravodivá vrstva (W) udržovaná v blízkosti teploty supravodivého přechodu (100 mK)
- změna teploty způsobená absorpcí fotonu se projeví jako změna vodivosti (proudu)
- rozliší až 8 fotonů
- $\eta = 95\%$ @ 1550 nm,
 $d \approx 3$ Hz, $\Delta t \approx 100$ ns,
 $\tau = 2$ μ s
- lze vyrobit pro jakoukoliv vlnovou délku mezi 200-1800 nm



Cabrera et al., APL 73, 735 (1998)
Rosenberg et al., PRA 71, 061803 (2005)
Lita et al., OE 16, 3032 (2008)

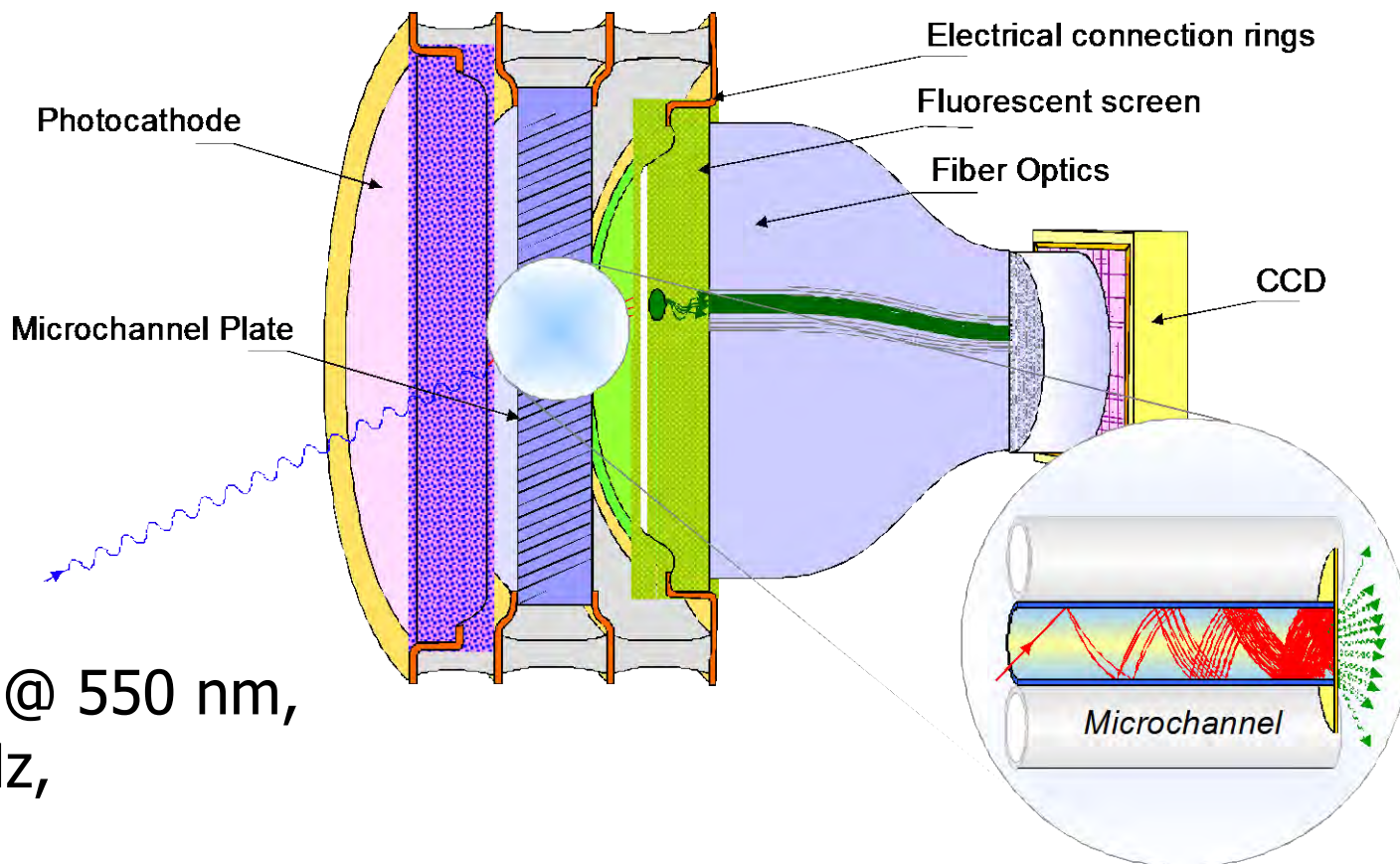


Vláknové smyčky





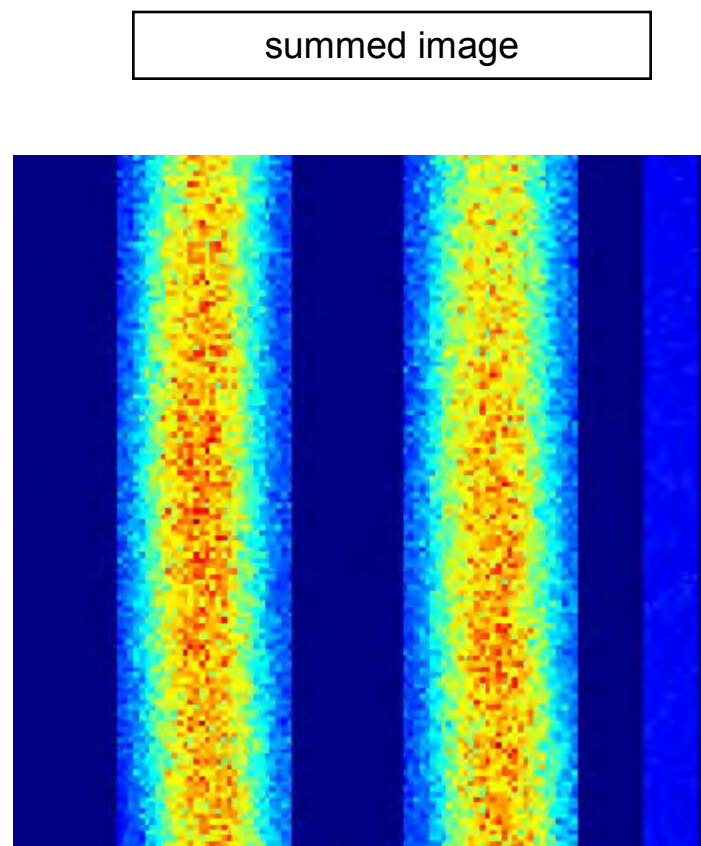
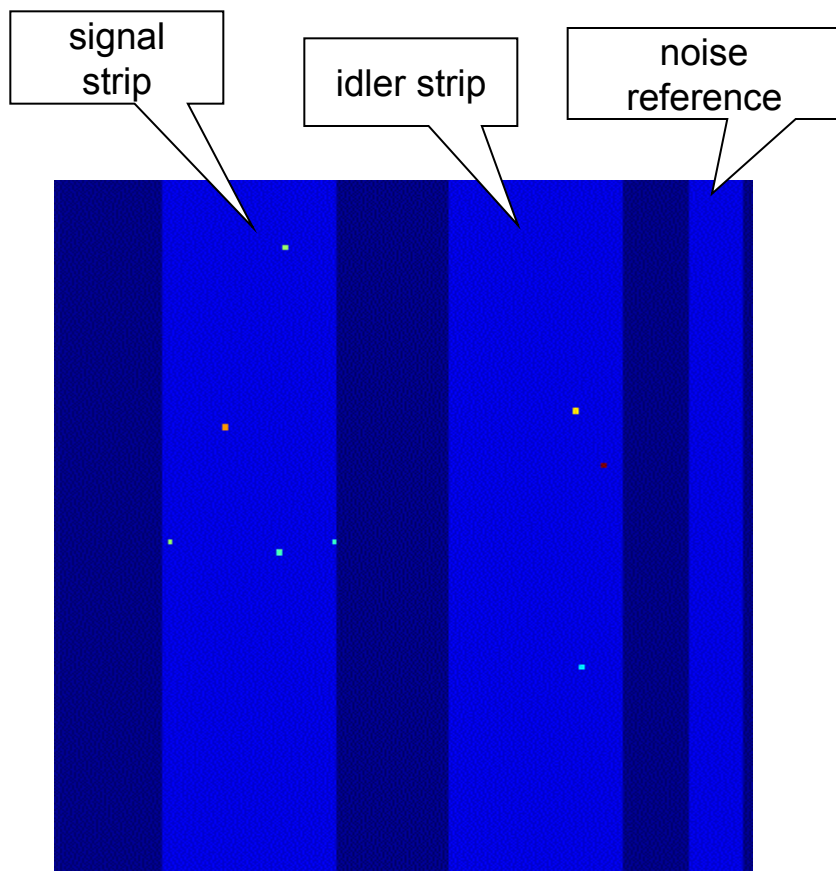
iCCD kamery



- $\eta = 25\% \text{ @ } 550 \text{ nm},$
 $d \sim 10^4 \text{ Hz},$
 $\Delta t \approx 2 \text{ ns}$



Detekce pomocí iCCD kamery





Chování fotonů na jednoduchých optických elementech



Co je na tom „kvantového“?



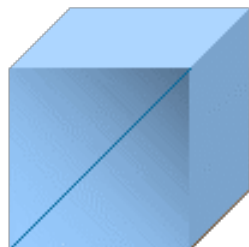
- Detekce světla po kvantech $h\nu$
- Principiální náhodnost individuálních událostí
- Měření obecně mění stav měřeného objektu
- Superpozice stavů (qubit)
- Kvantová provázanost (entanglement)
- Teorém o neklonování



Foton na děliči svazku

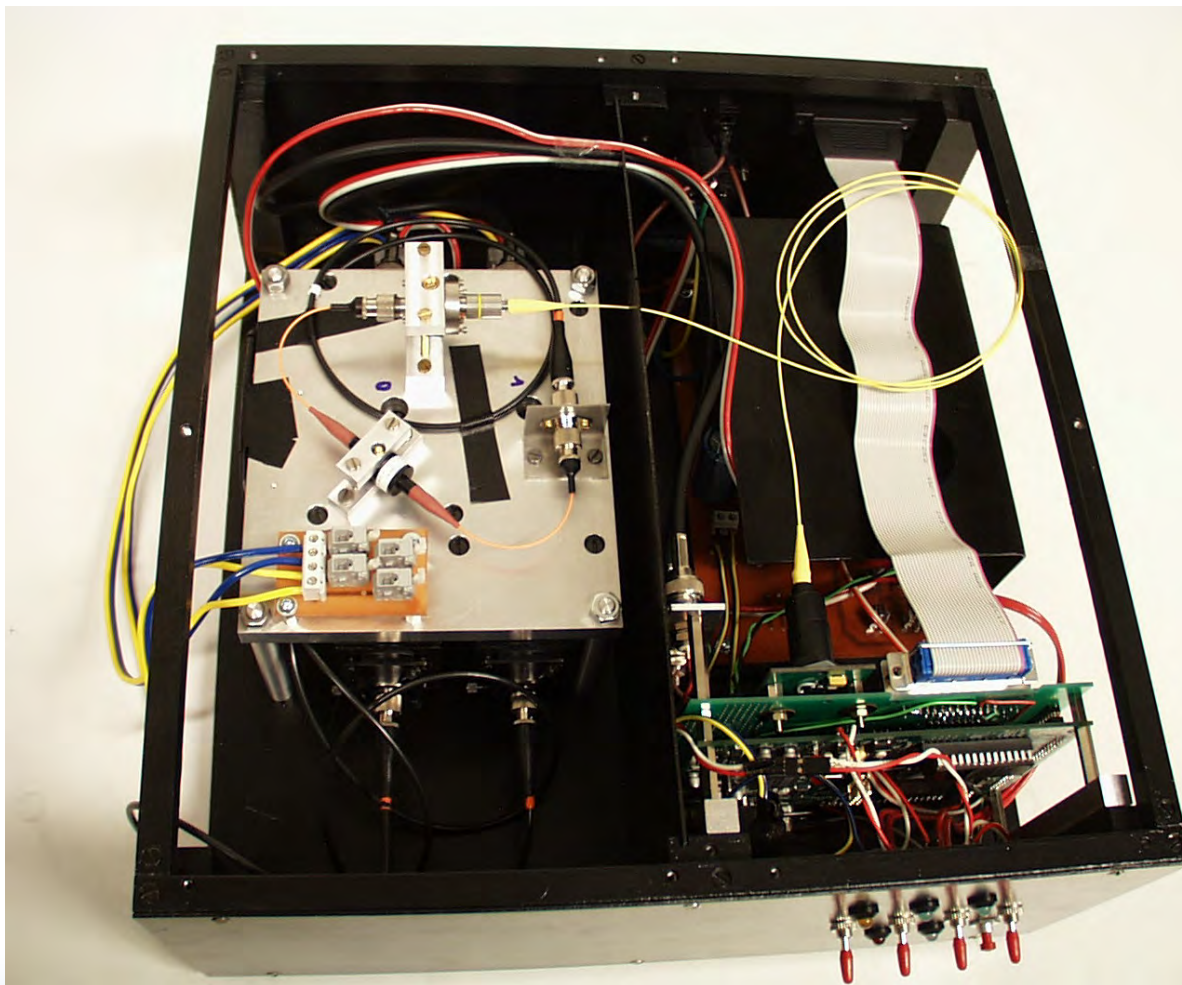


detektor B



detektor A

Generátor náhodných čísel



*J. Soubusta, O. Haderka, M. Hendrych, P. Pavlíček,
Quantum random number generator, Proc. SPIE Vol. 5259, p. 7-13 (2003)*



Co je na tom „kvantového“?



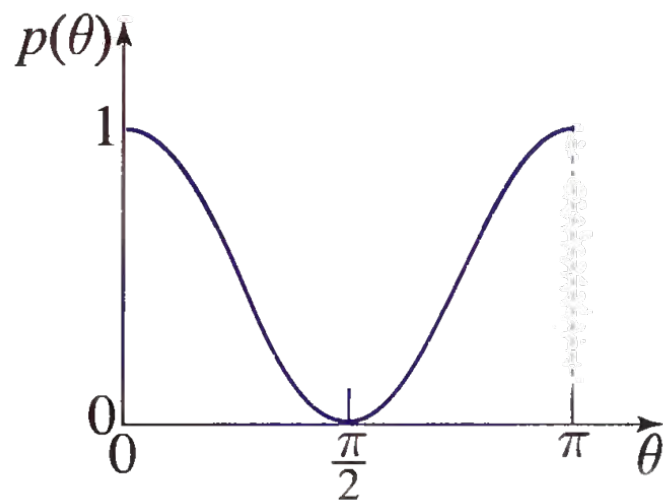
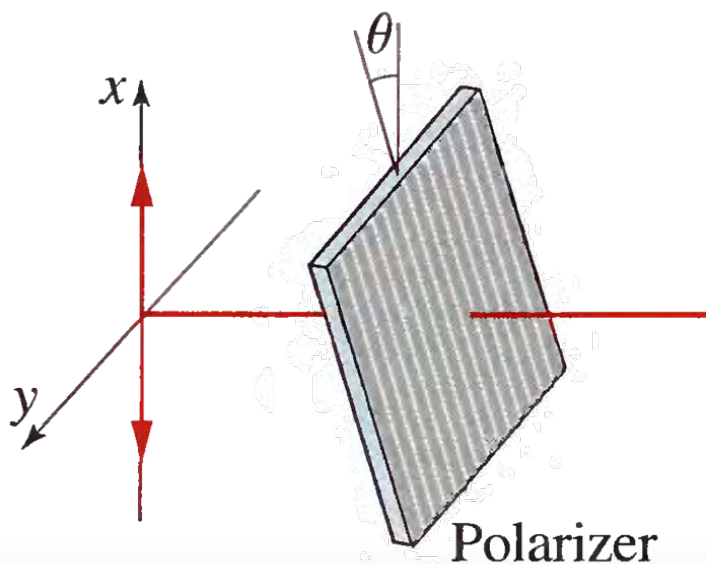
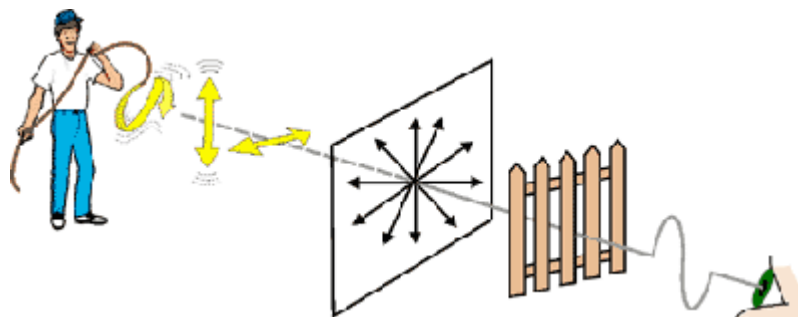
- Detekce světla po kvantech $h\nu$
- Principiální náhodnost individuálních událostí
- Měření obecně mění stav měřeného objektu
- Superpozice stavů (qubit)
- Kvantová provázanost (entanglement)
- Teorém o neklonování



Foton na polarizátoru

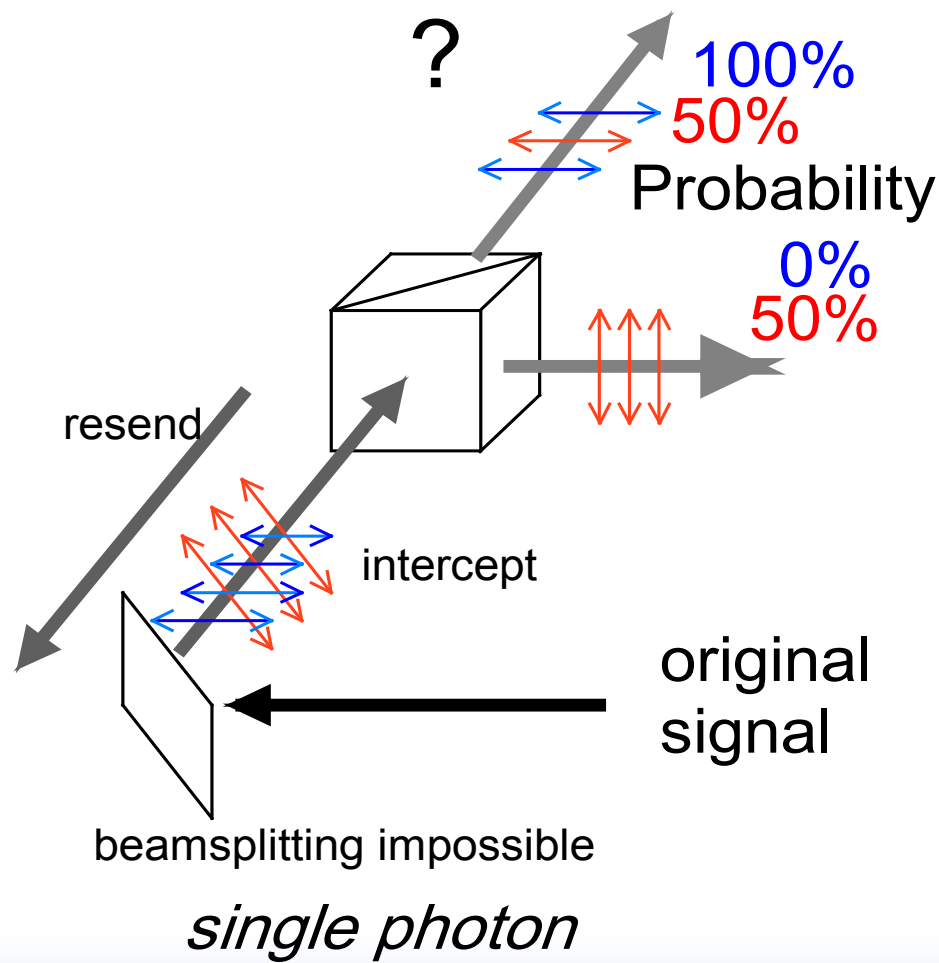
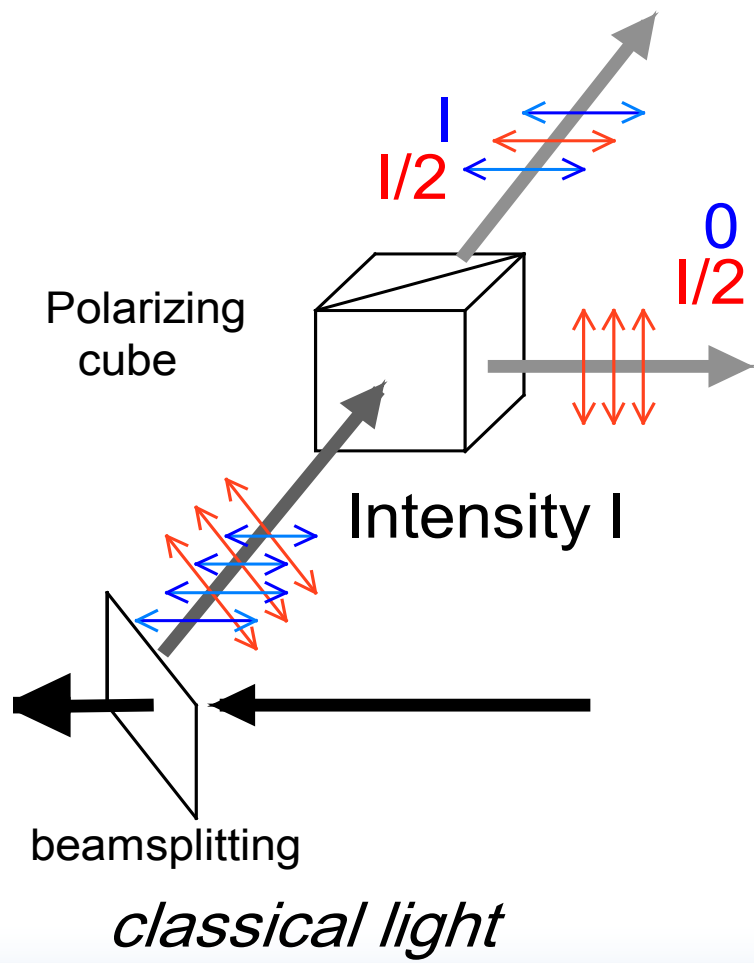


➤ $p(\theta) = \cos^2(\theta)$





Měření neortogonálních stavů





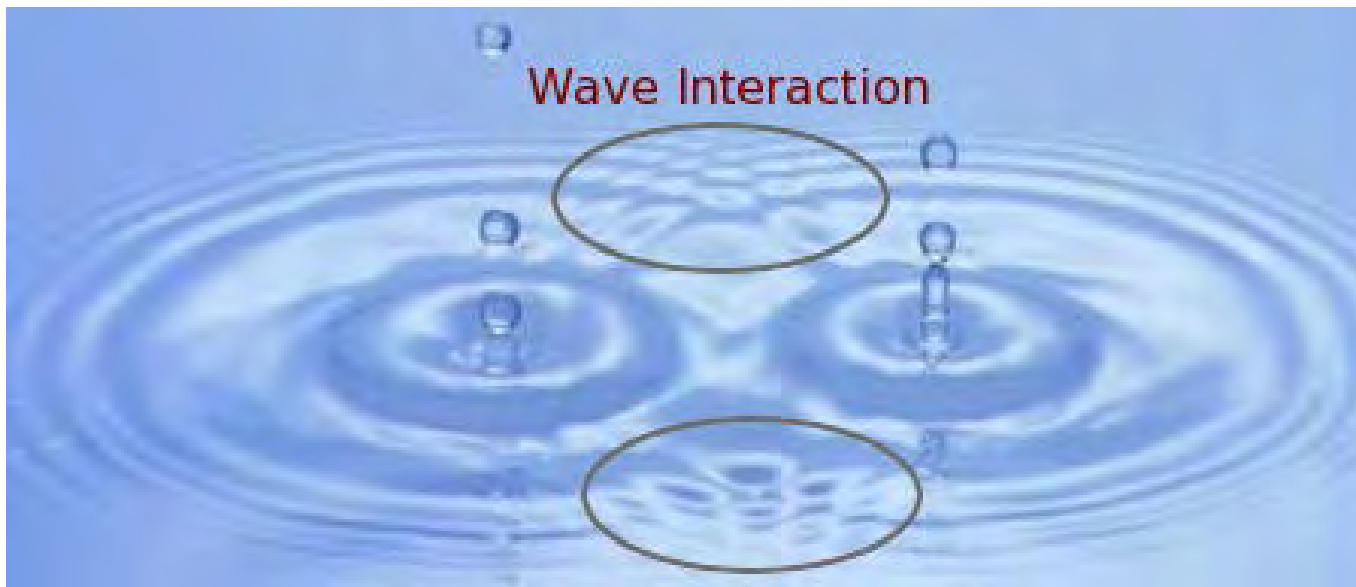
Co je na tom „kvantového“?



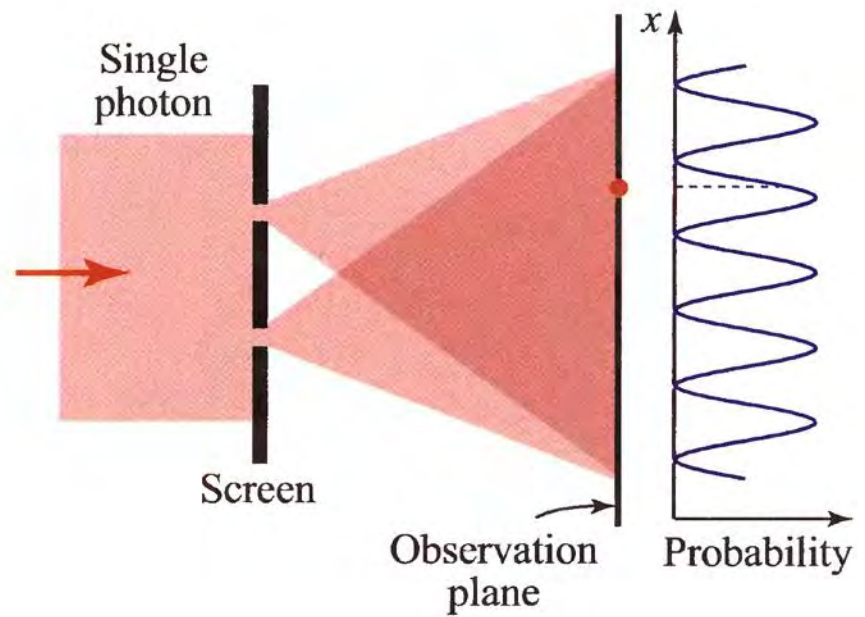
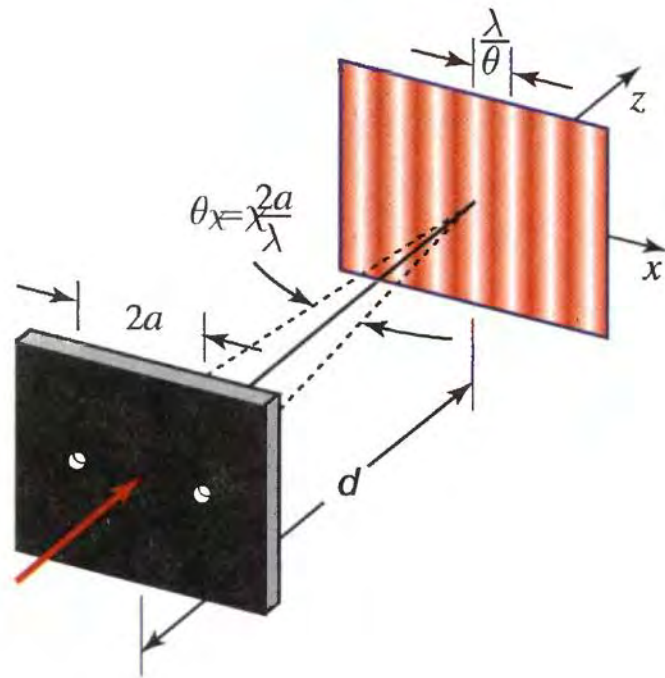
- Detekce světla po kvantech $h\nu$
- Principiální náhodnost individuálních událostí
- Měření obecně mění stav měřeného objektu
- Superpozice stavů (qubit)
- Kvantová provázanost (entanglement)
- Teorém o neklonování



Interference

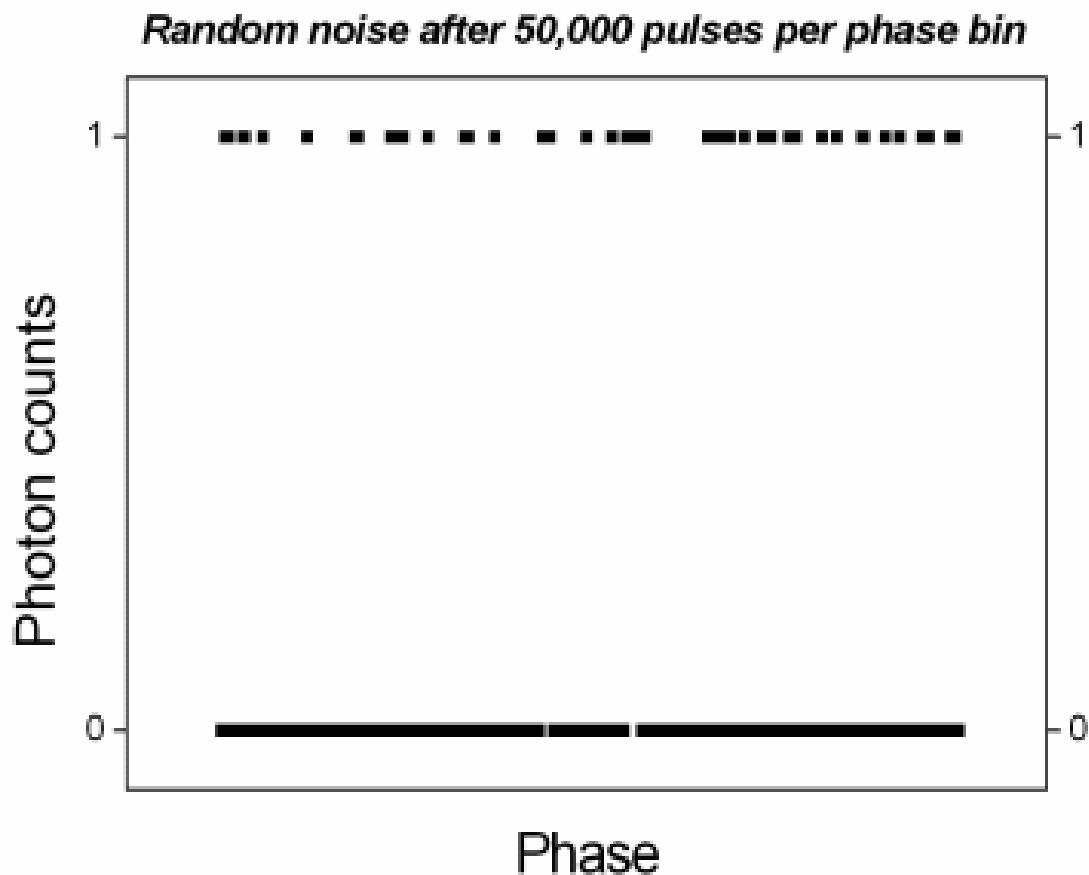


Foton v interferometru

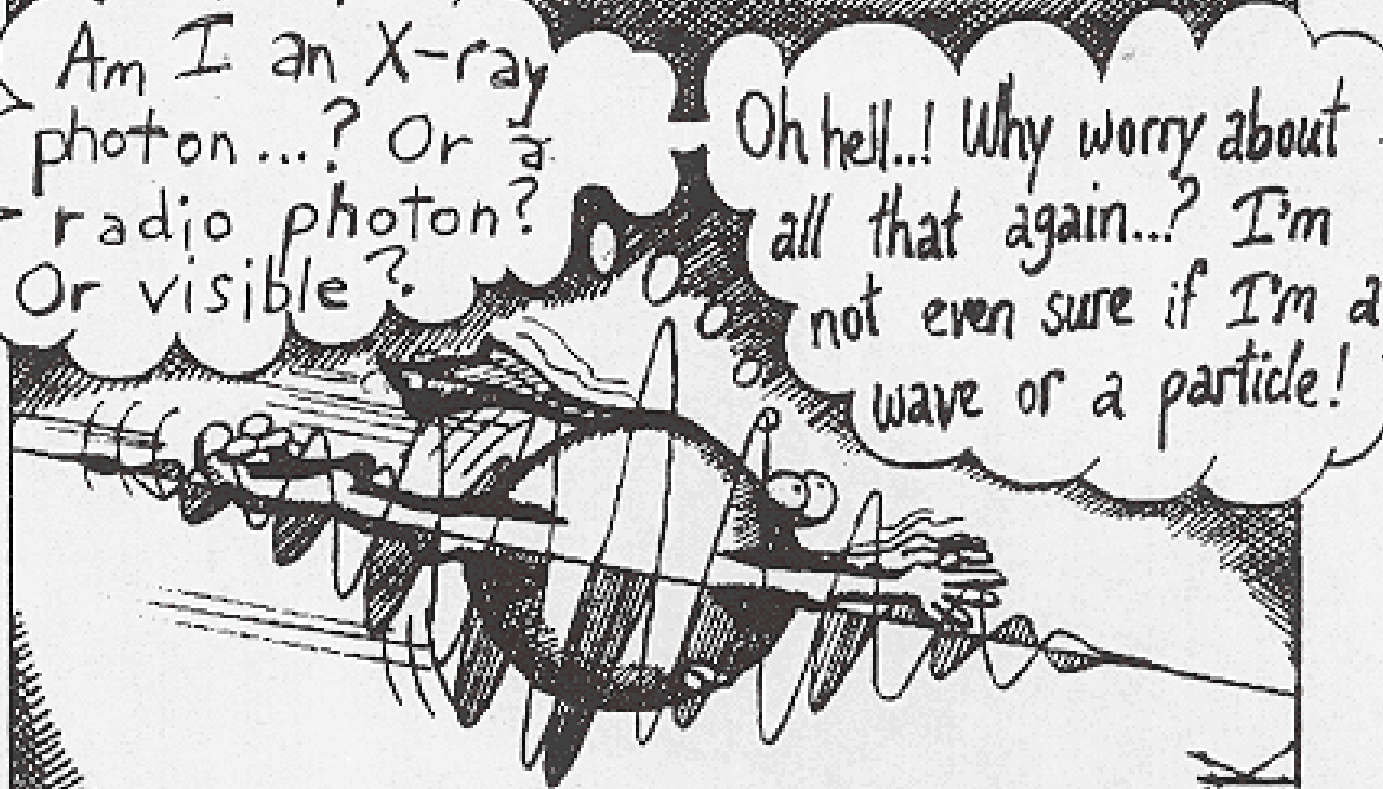




Foton v interferometru



Machův-Zehnderův interferometr, 4×10^{-6} fotonu na impuls



Am I an X-ray
photon...? Or a
radio photon?
Or visible?

Oh hell...! Why worry about
all that again...? I'm
not even sure if I'm a
wave or a particle!

= PHOTON SELF-IDENTITY PROBLEMS =

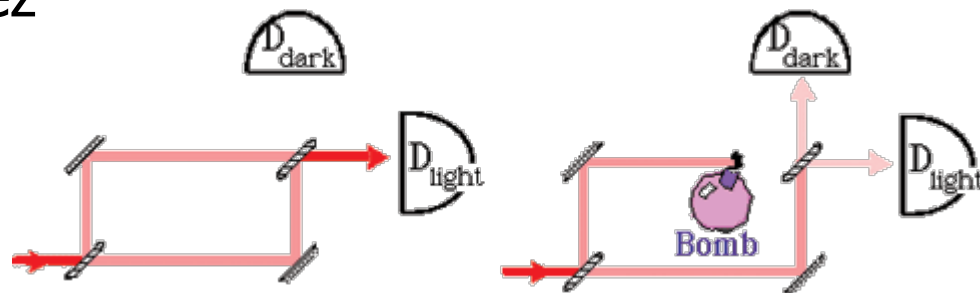




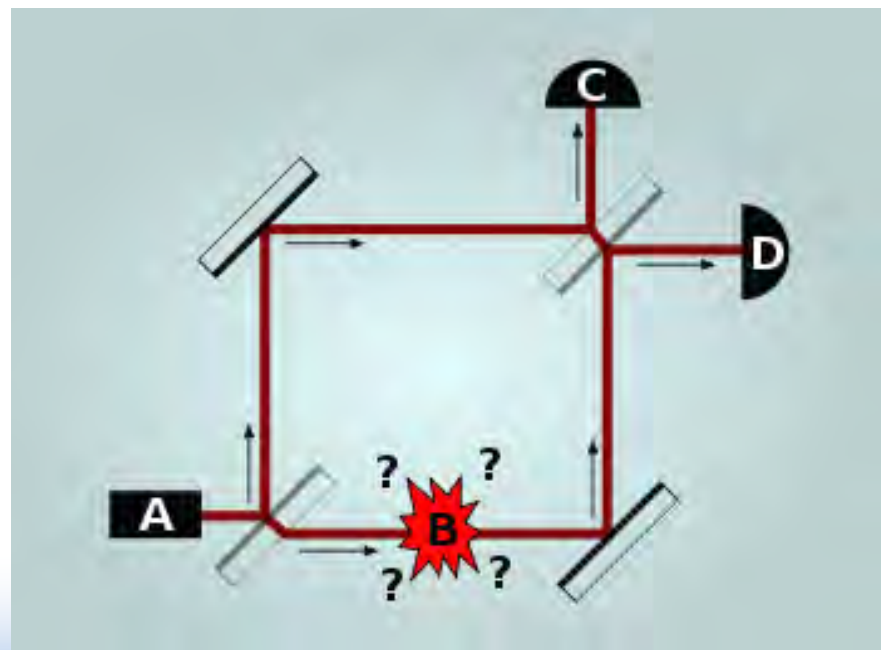
Bezinterakční měření



- Nalezení vadných bomb bez odpálení těch funkčních
- Elitzur a Vaidman (1993)
- experiment Zeilinger et al. (1994)

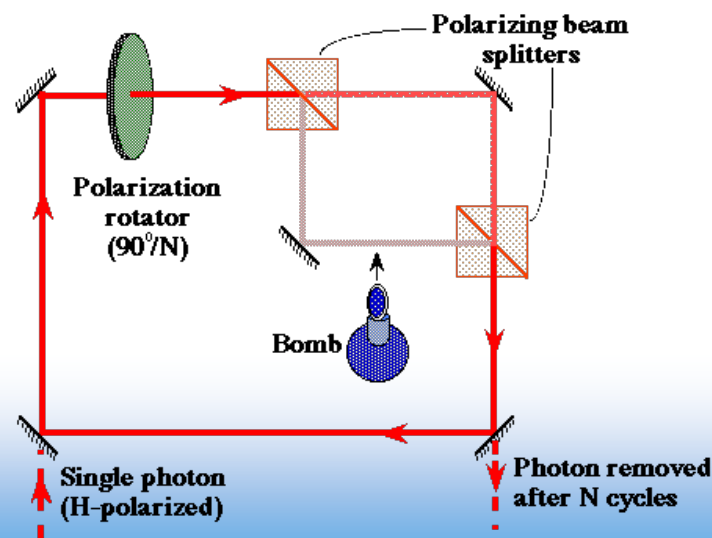
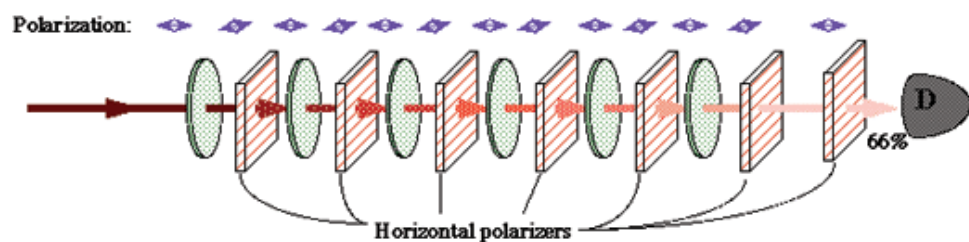
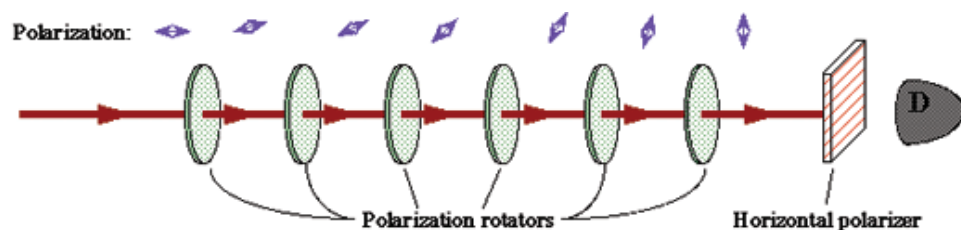


- Funkční bombu lze odpálit dopadem jediného fotonu
- Nefunkční bomba s fotonem neinteraguje vůbec
- Detekce na detektoru C znamená úspěšnou detekci bomby (25%) oproti (50%) výbuchu ($\eta=1/3$).
- Lze dosáhnout až $\eta=1/2$ s nevyváženým děličem.



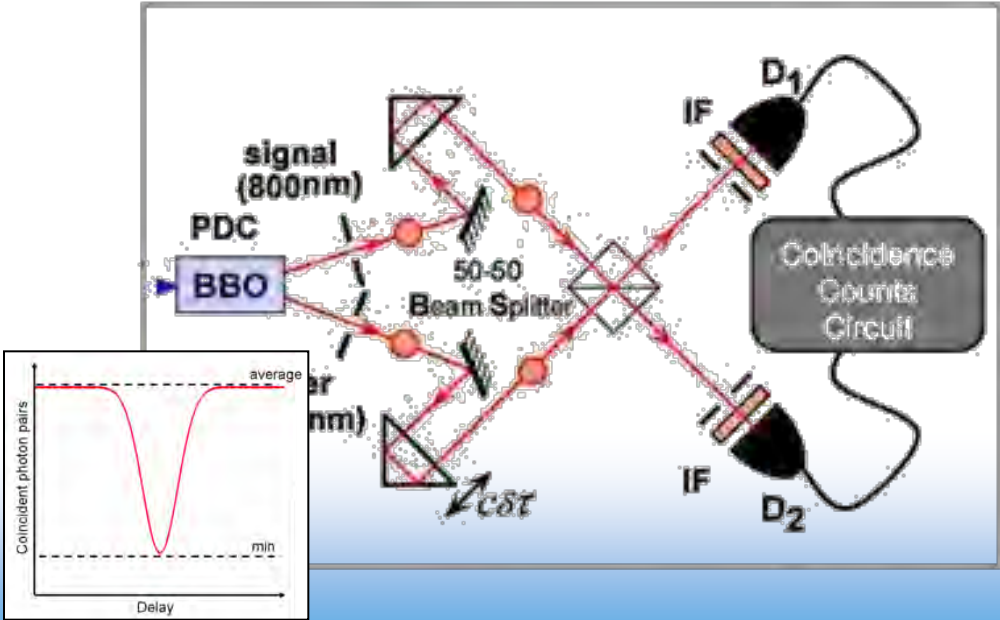
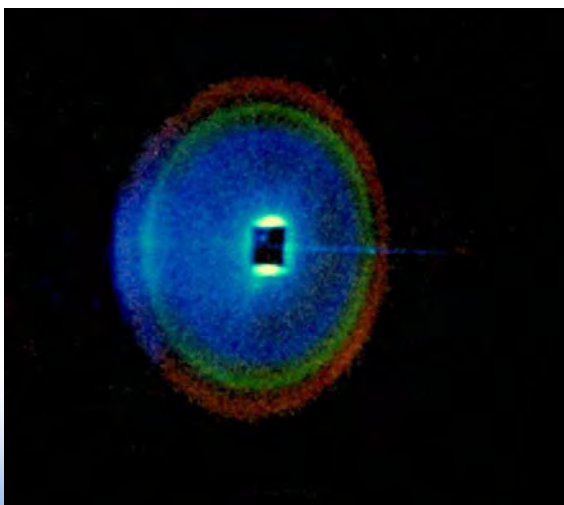
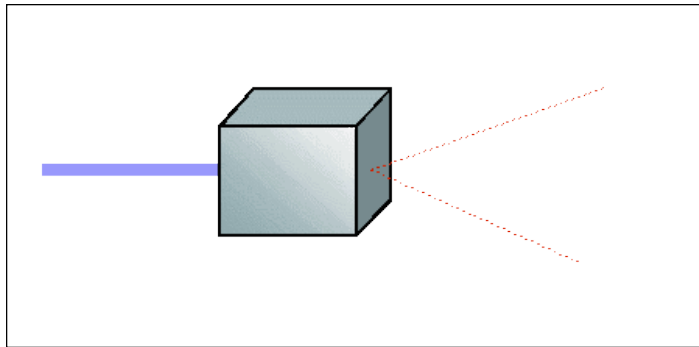
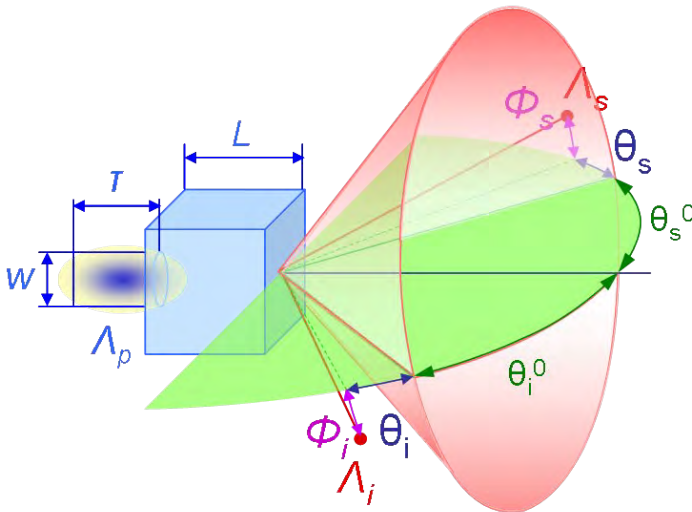
Kvantový Zenónův jev

- Zénón z Eleje (5. stol. př. n. l.) – Achilles nedohoní želvu, letící šíp stojí
- 6 polarizačních rotátorů, každý otáčí polarizaci o 15° - foton přes poslední polarizátor neprojde
- jestliže vložíme polarizátor za každý rotátor, pak foton projde s pravděpodobností $[\cos^2(15^\circ)]^6 \approx 0,66$



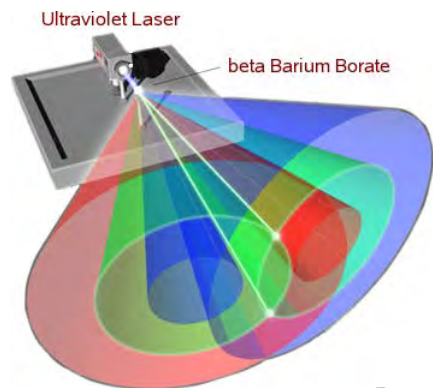


Fotonové páry a interference fotonů





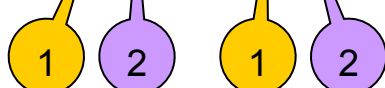
Kvantová provázanost

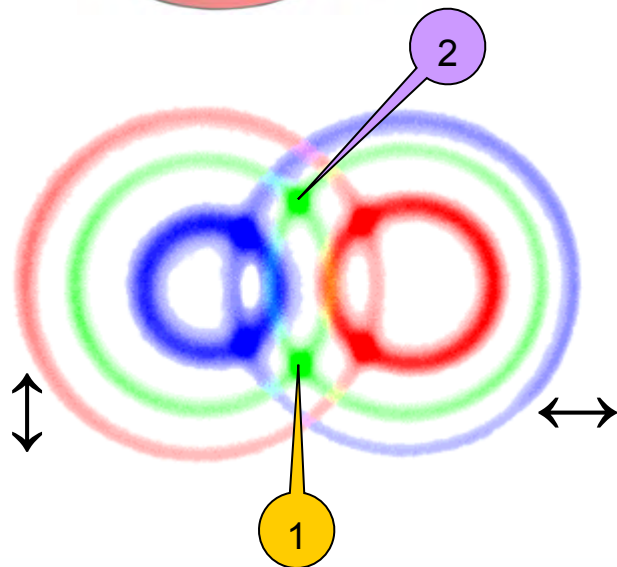


superpozice

$$|+45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle)$$

kvantová
provázanost

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle + |VH\rangle)$$




Spor o interpretaci kvantové mechaniky

EPR paradox (1935)

Bellův teorém (1964)

experimenty - Aspect et al. (1981-2) a
řada dalších

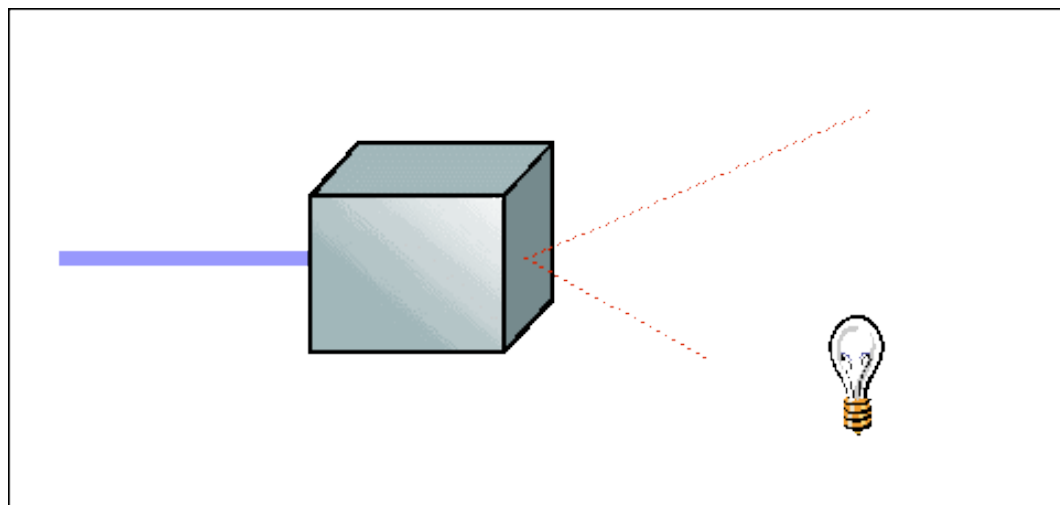


Generace jednotlivých fotonů



Není snadné vytvořit **jednotlivé** fotony!

Zeslabené optické pulsy mohou obsahovat i **žádný** nebo naopak **více než jeden** foton.



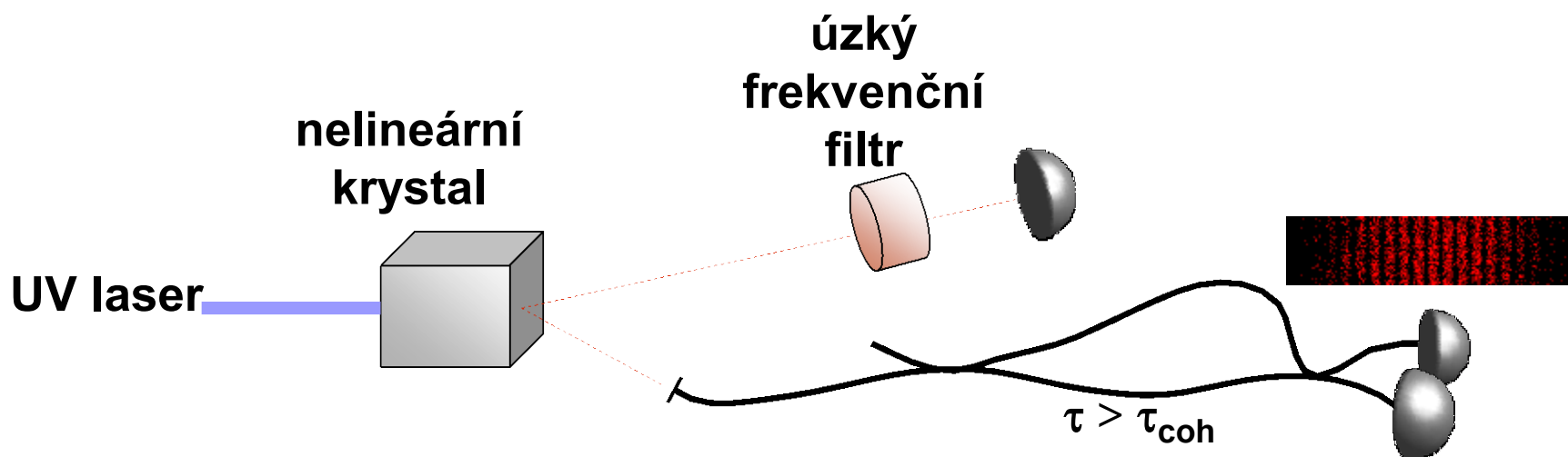
Využíváme toho, že „entanglované“ fotony vznikají vždy **v párech** a vybíráme jen jednofotonové události.



Kvantová „nelokalita“

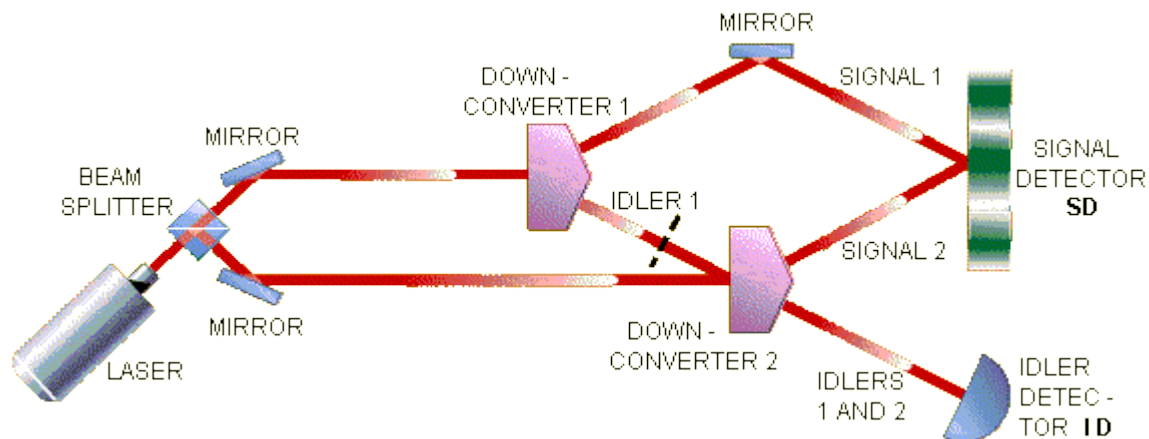


Způsobení interference „na dálku“



Vložení úzkého frekvenčního filtru **do dráhy jednoho fotonu** z korelovaného páru fotonů indukuje vznik interferenčního obrazce v interferometru umístěném **v dráze druhého svazku**.

Rozhoduje informace



Mandel et al.. 1991



Co je na tom „kvantového“?



- Detekce světla po kvantech $h\nu$
- Principiální náhodnost individuálních událostí
- Měření obecně mění stav měřeného objektu
- Superpozice stavů (qubit)
- Kvantová provázanost (entanglement)
- Teorém o neklonování

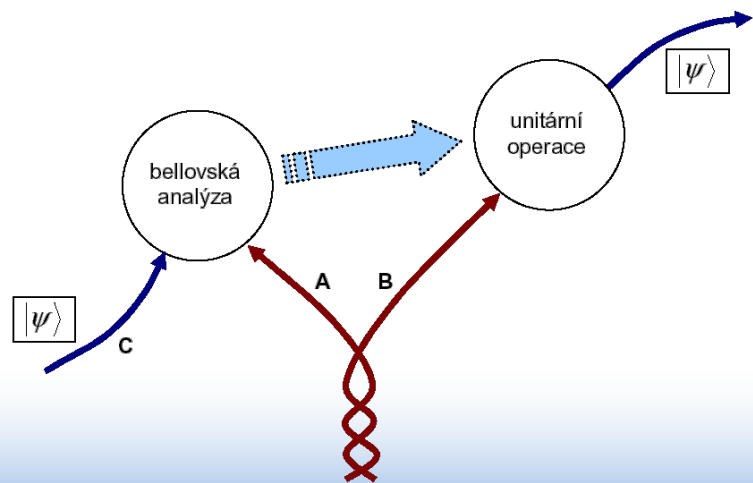


Teorém o nemožnosti klonování



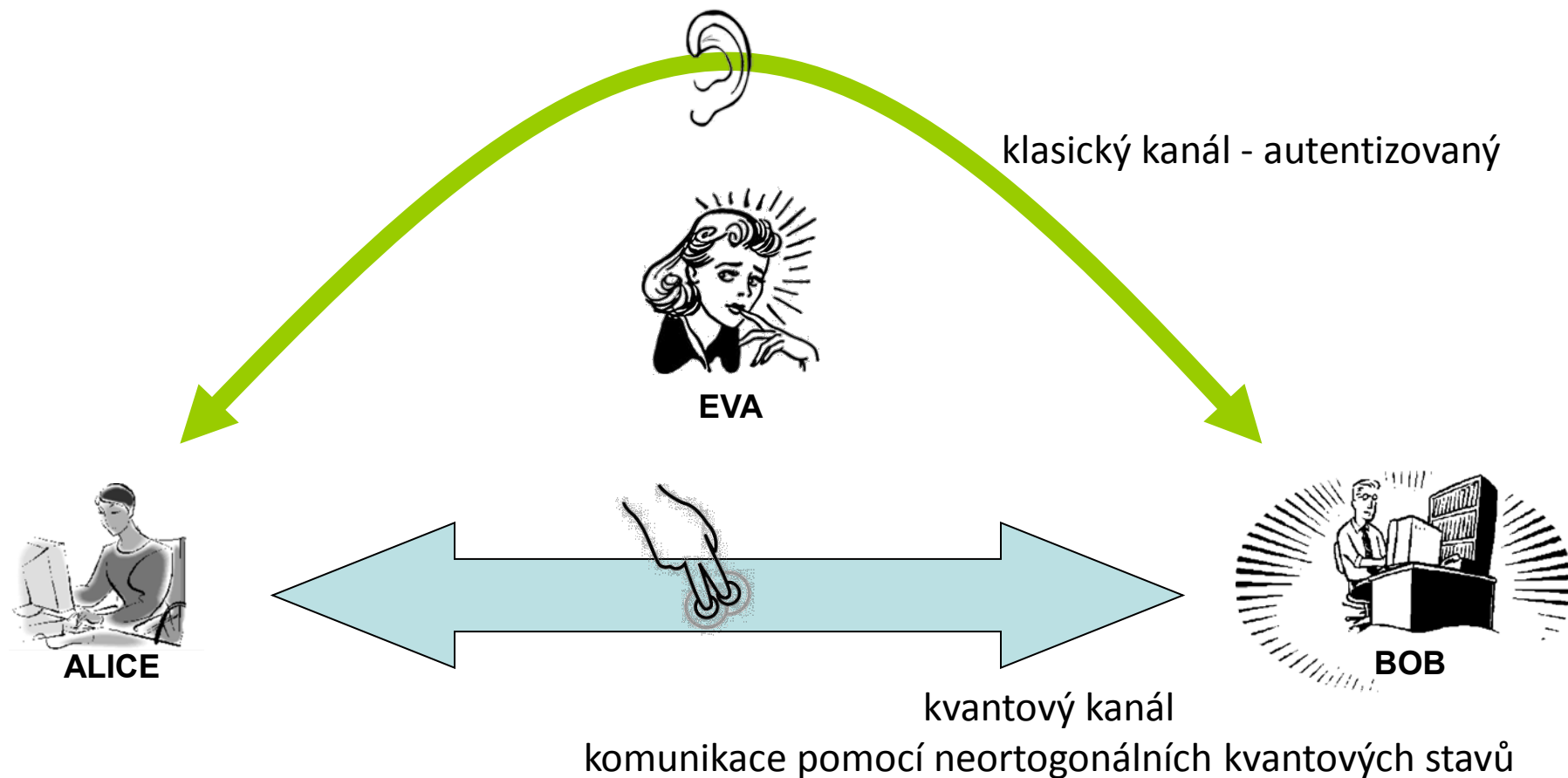


Kvantová teleportace

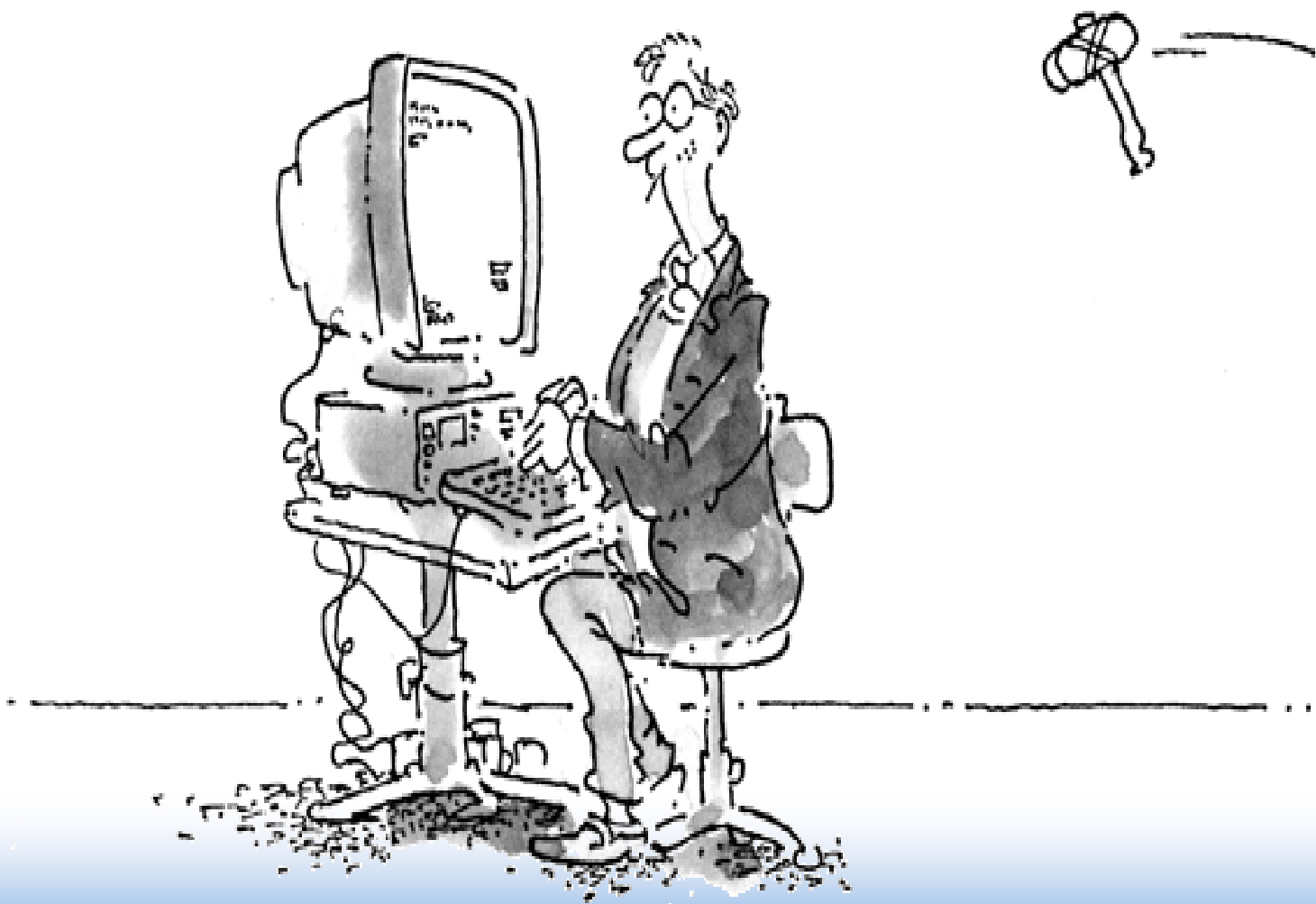




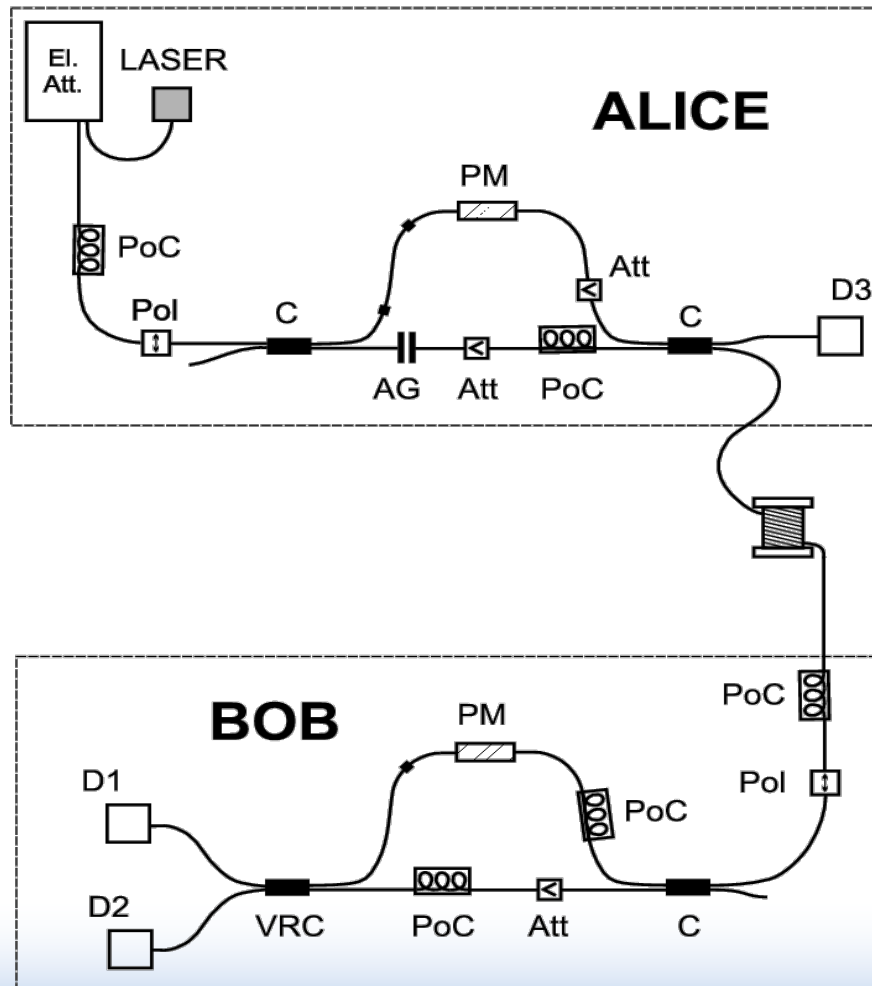
Kvantová kryptografie



Množství informace, které může Eva získat, lze kvantifikovat na základě měřitelného stupně degradace komunikace na kvantovém kanálu. To při komunikaci po klasickém kanálu nelze!!!

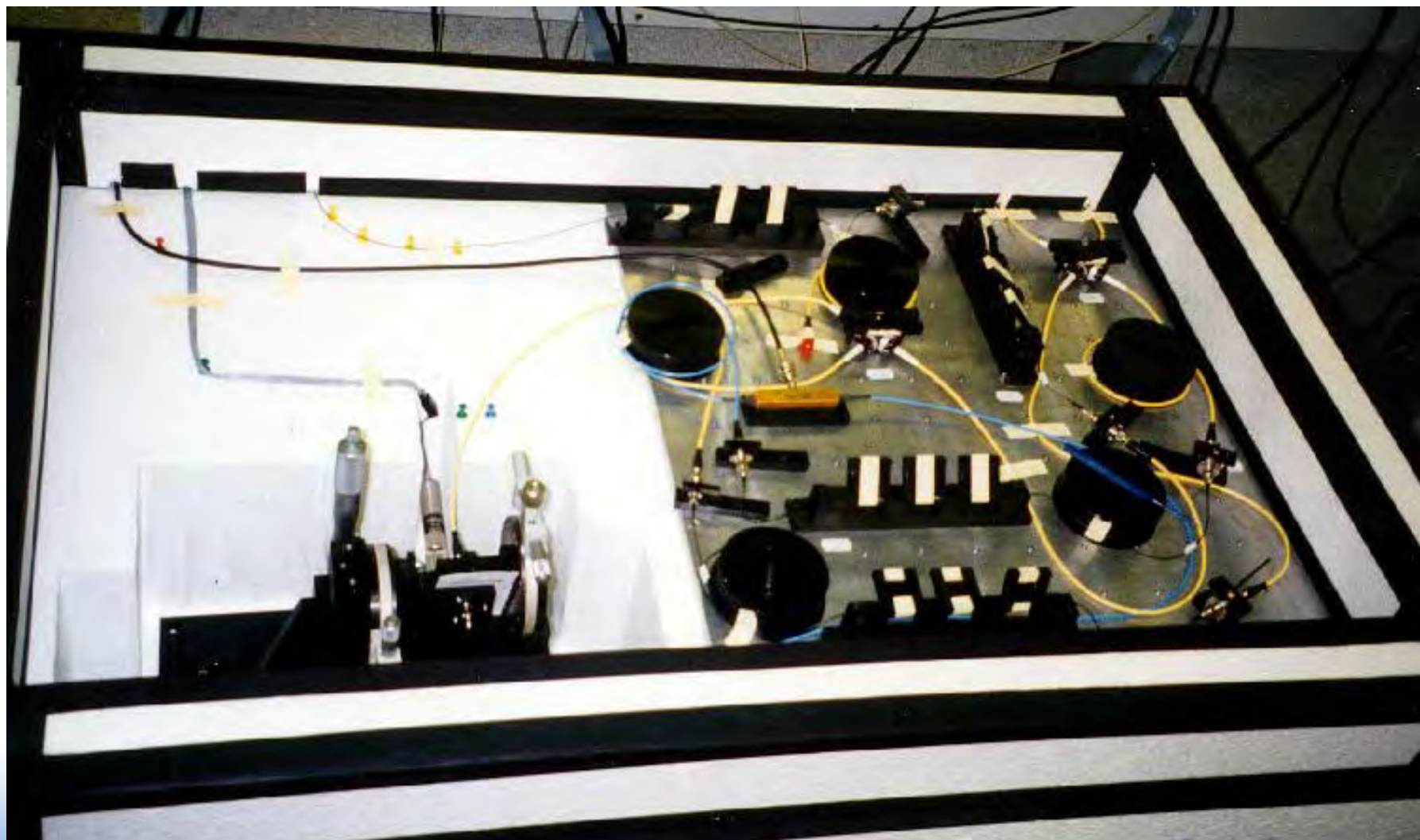


QKD v Olomouci (1998)



- Vzdálenost 0,5 km
- Vizibilita: 99,7%
- Chybovost: 0,3%
- Rychlost: 4,3 kbit/s







O našem pracovišti...

Společná laboratoř optiky
UP a FZÚ AV ČR



Univerzita Palackého



- založena 1573
- dnes 8 fakult
- cca 21.000 studentů





Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.



- má sídlo v Praze
- největší ústav AV ČR (cca 770 zaměstnanců)
- 10 společných laboratoří s univerzitami

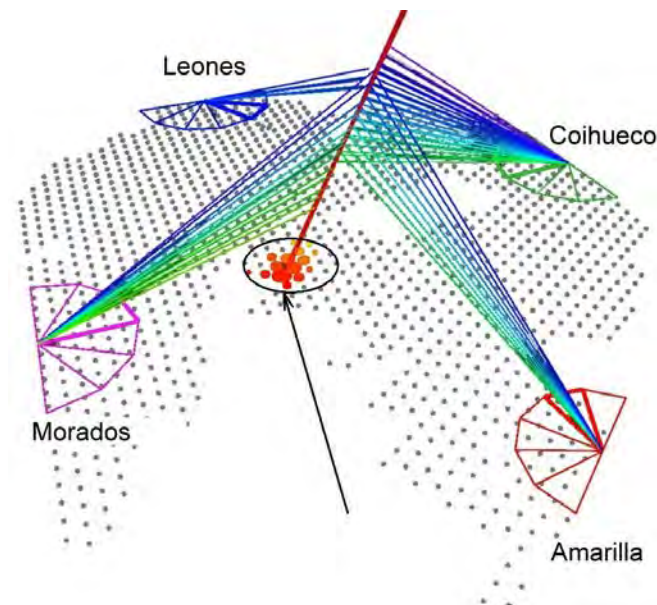




Společná laboratoř optiky



- Klasická optika, komponenty pro velké mezinárodní projekty (CERN, Observatoř Pierra Augera, Cherenkov Telescope Array)
- Laserové technologie
- Kvantová a nelineární optika
- od. r 2010 součást RCPTM





Společná laboratoř optiky – povodně 1997





Děkuji za pozornost



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL DEVELOPMENT FUND
INVESTING IN YOUR FUTURE



OP Research and
Development for Innovation