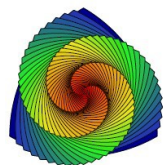


Laserové chlazení elementárních částic

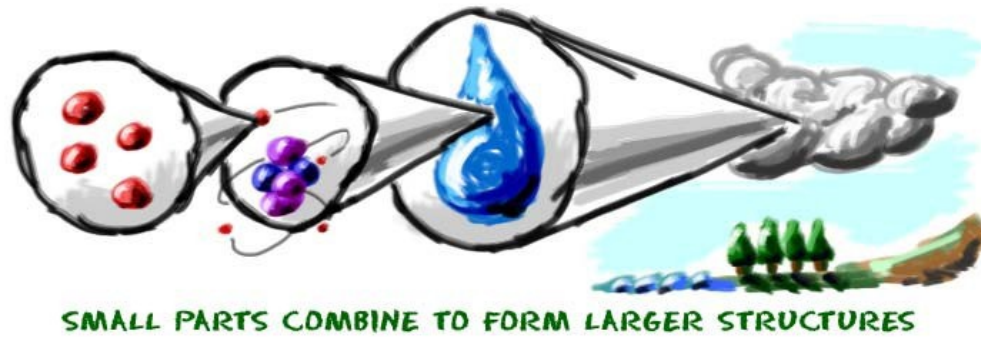
Lukáš Slodička

Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého



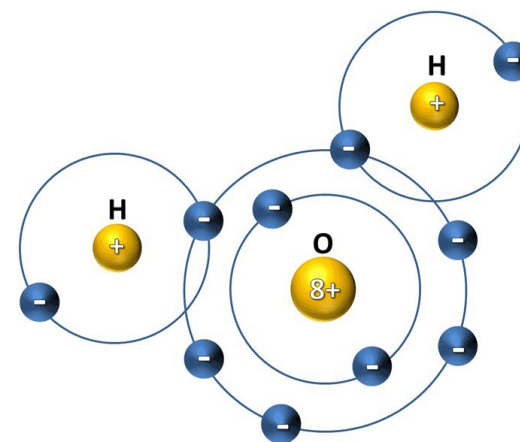
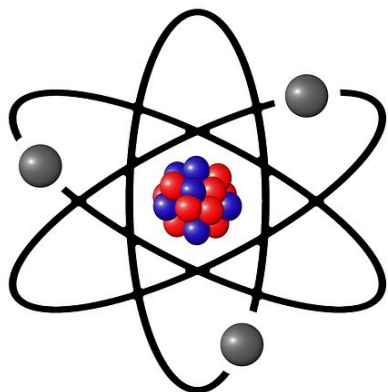
OLMOUCKÝ FYZIKÁLNÍ
KALEIDOSKOP

Ako chladiť atómy?



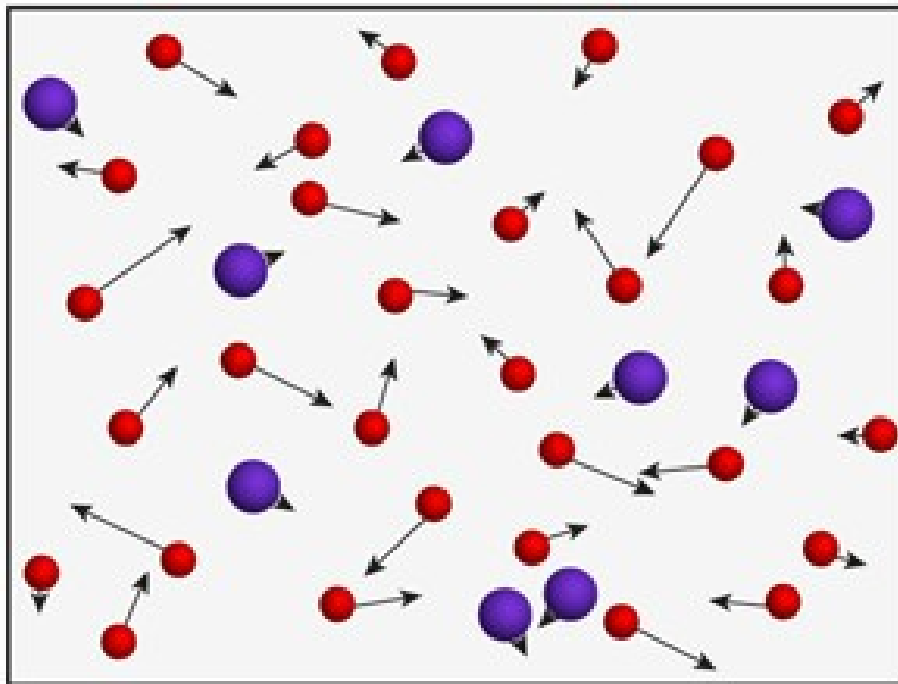
Kryokomora (-156°C)

Izolované elementárne častice



Prečo chladit' elementárne častice?

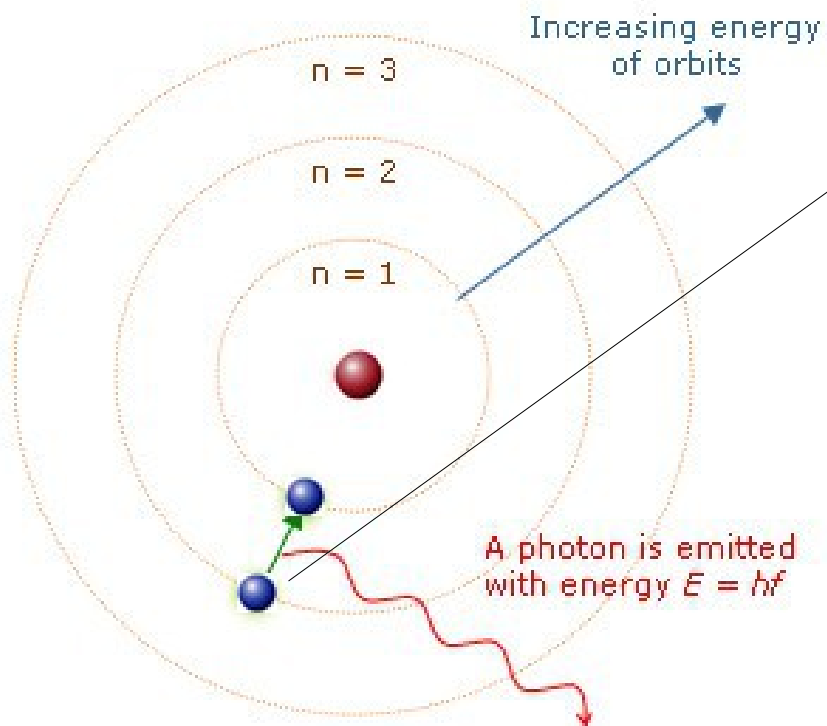
Atómy a molekuly pri izbových teplotách: $v \sim 300$ m/s



- časový limit pre pozorovateľnosť a manipuláciu!
- atóm Na při 293 K preletí 1m za pár ms

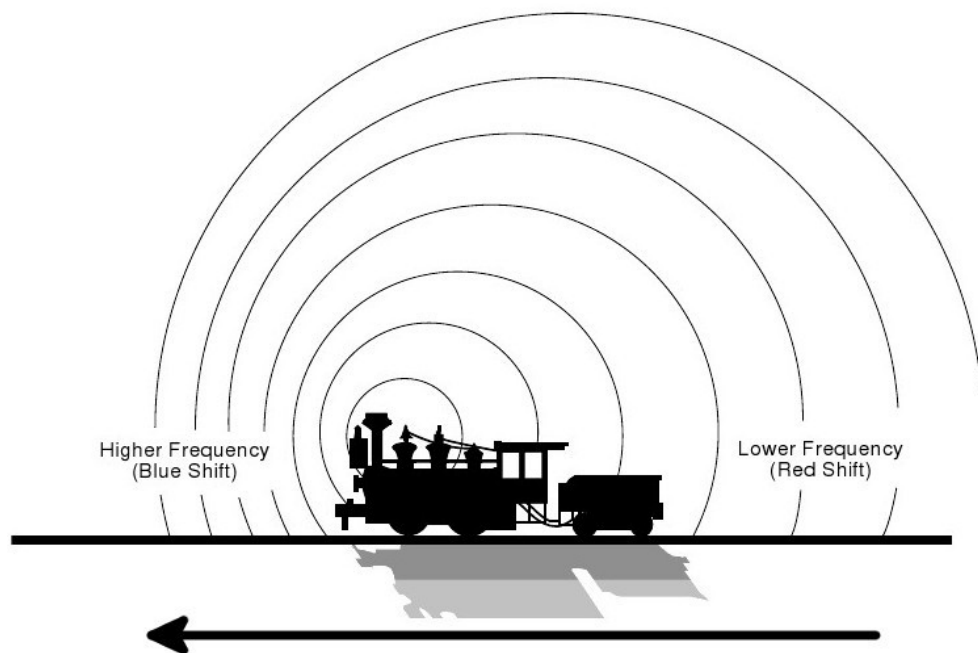
Posuv a rozšírenie atómových spektrálnych čiar

Model atómu



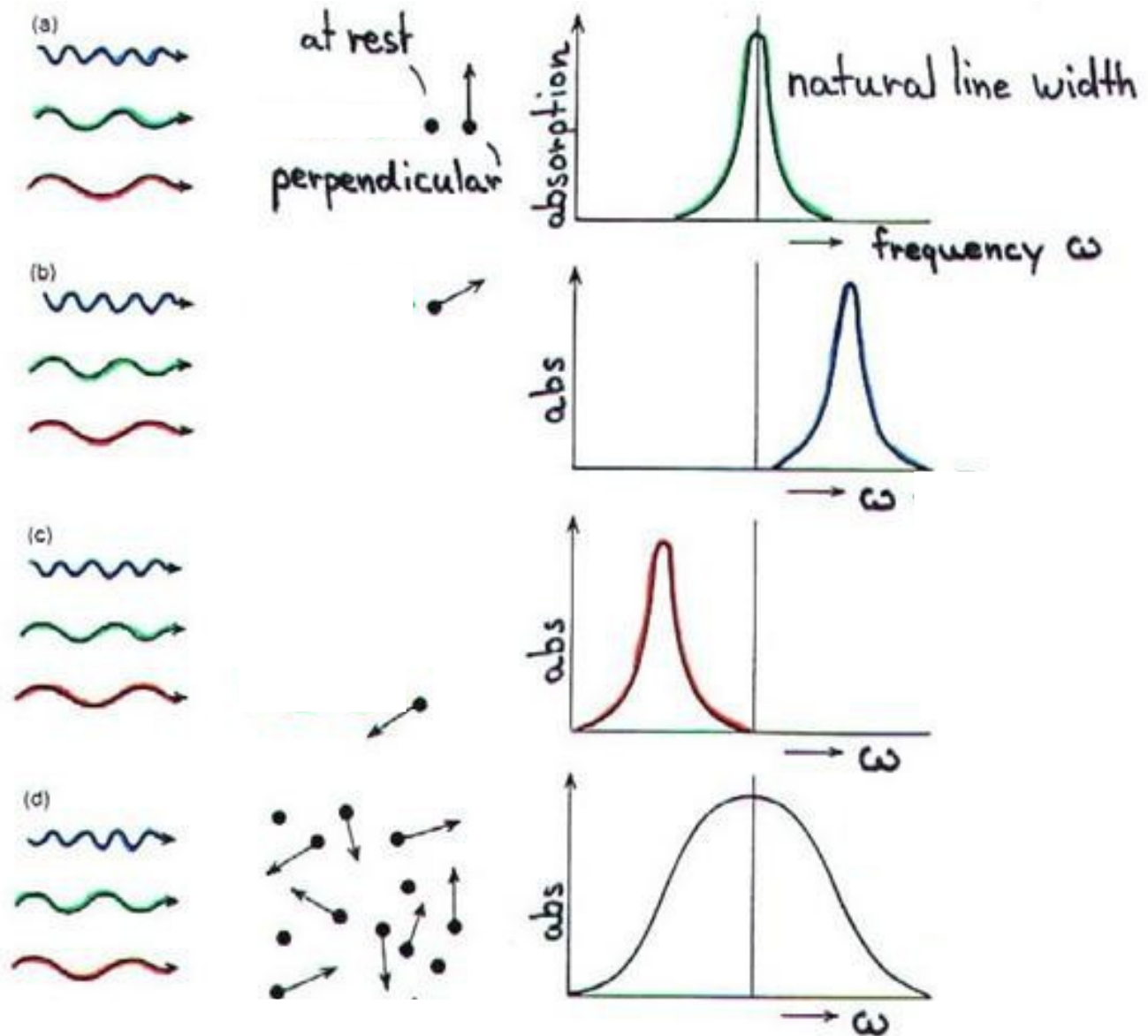
Emisia fotónu zodpovedá energetickému rozdielu dvoch presne definovaných elektrónových hladín

Pohybujúci sa atóm → Dopplerov jav



Posuv a rozšírenie atómových spektrálnych čiar

- Dopplerov jav



Ako chladiť elementárne častice?



Tekutý dusík



Pri 77 K majú molekuly dusíka rýchlosť 150 m/s

Héliový kryostat

Pri 4 K majú atómy
hélia rýchlosť 90 m/s

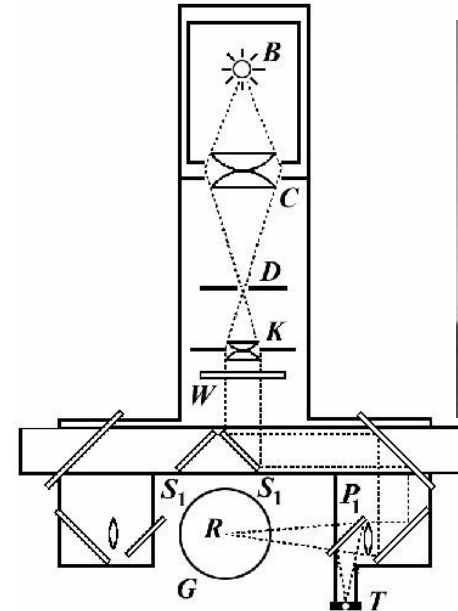


Iný druh chladenia?

Svetlo pôsobí silou - radiačný tlak

Chvosty komét

J. Kepler (1619)



P. Lebedev (1900)

A. Einstein

A. Compton

R. Frisch (1933)

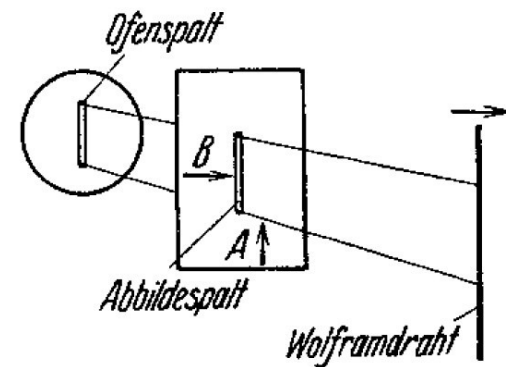
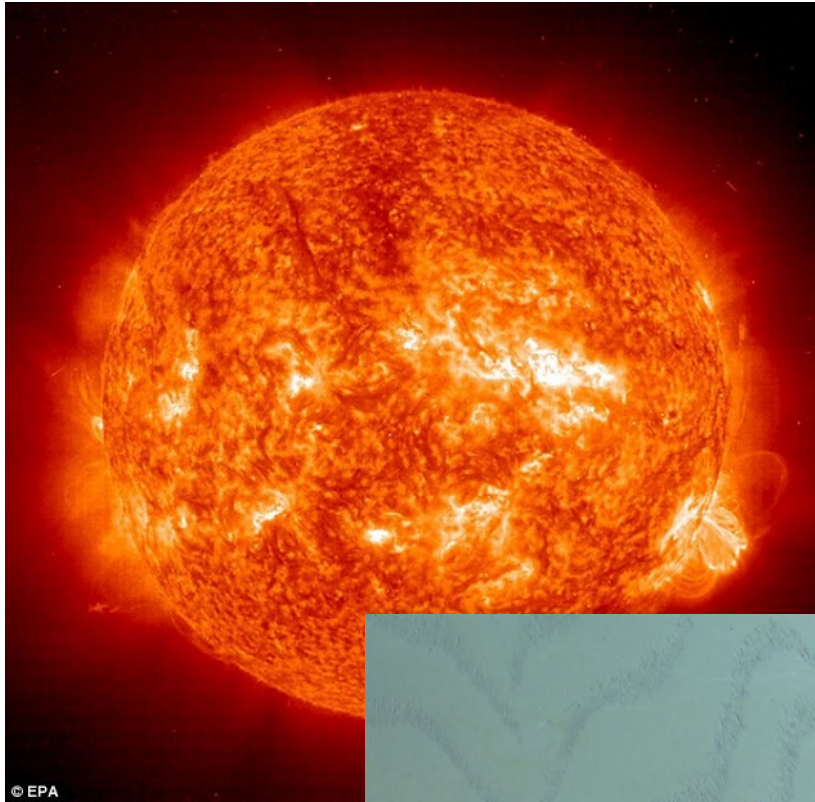


Fig. 1.

Schematische Darstellung
der Versuchsanordnung.

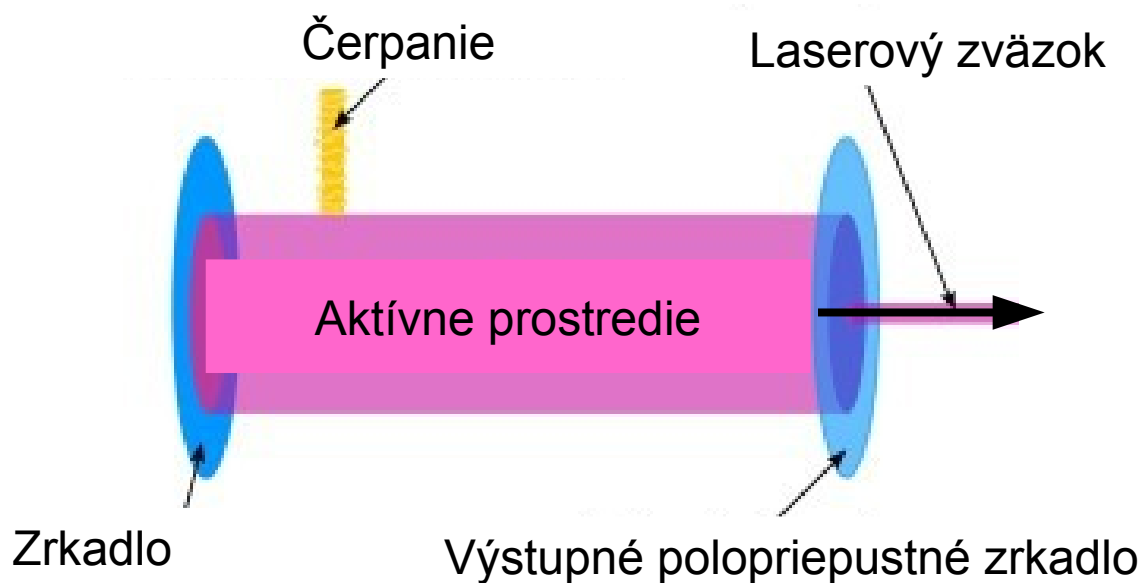
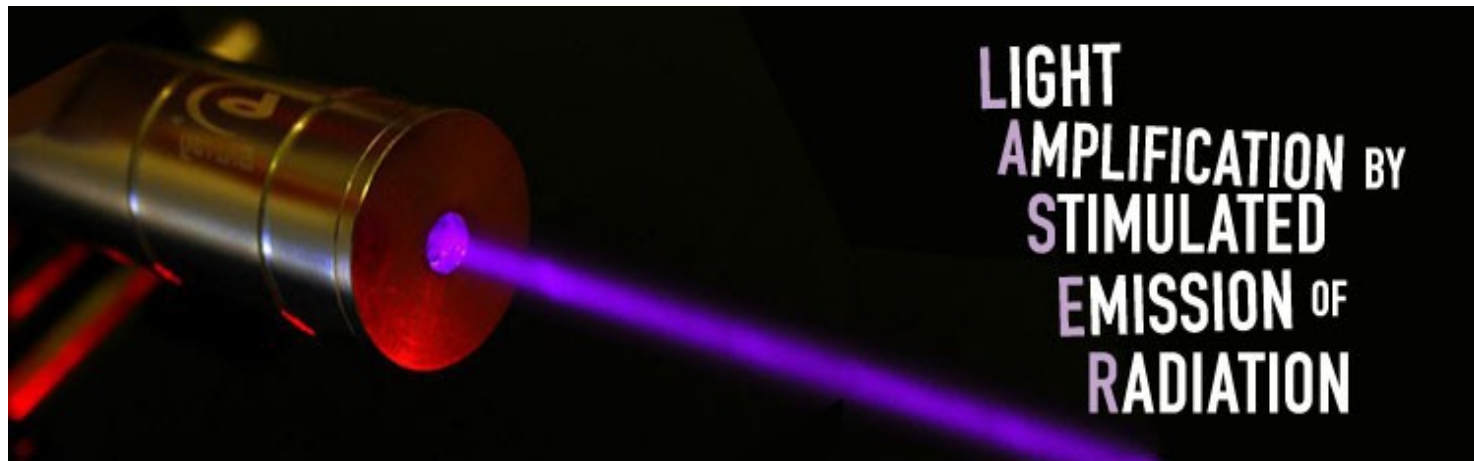
Svetlo pozostáva z elementárnych kvant - fotónov
Veľkosť hybnosti fotónu: $p=h/\lambda$

Ale svetlo hreje!

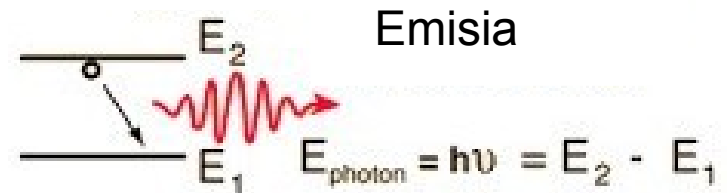
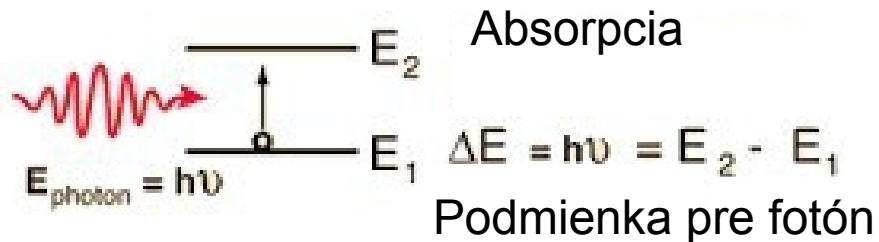


Môže svetlo chladit' - LASER

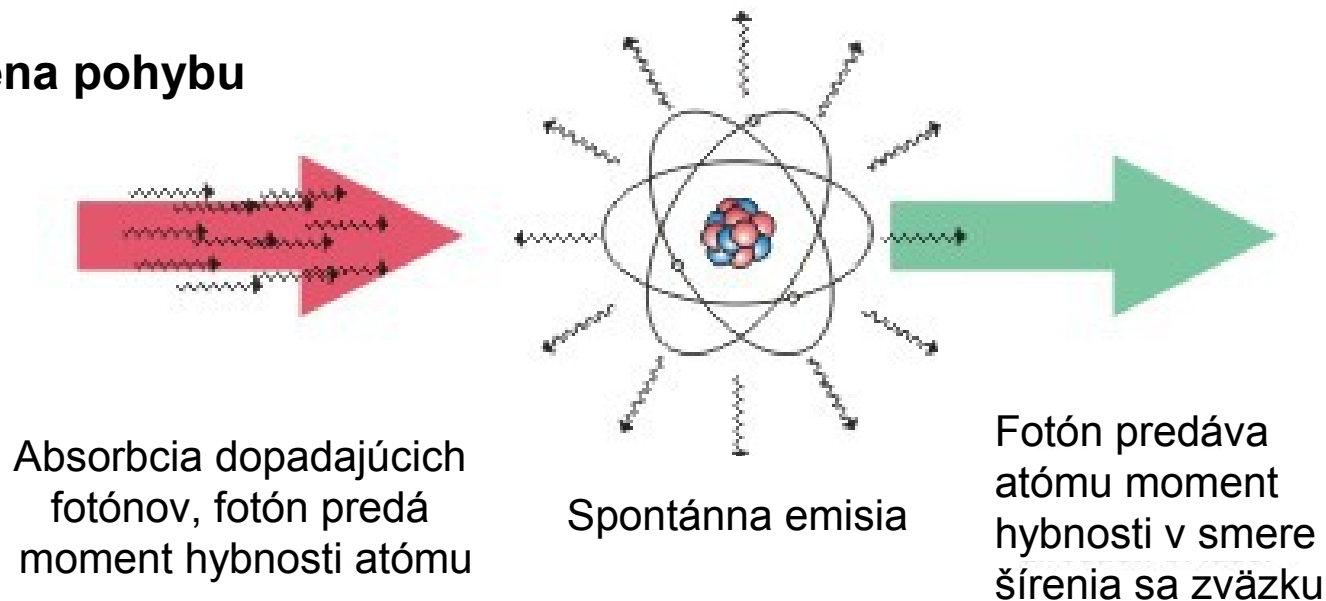
Potrebujeme intenzívny a úzkopásmový zdroj svetla



Interakce laserového světla a atómu

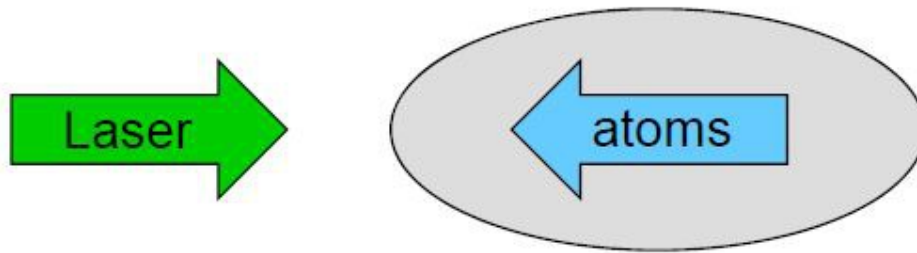


– zmena pohybu

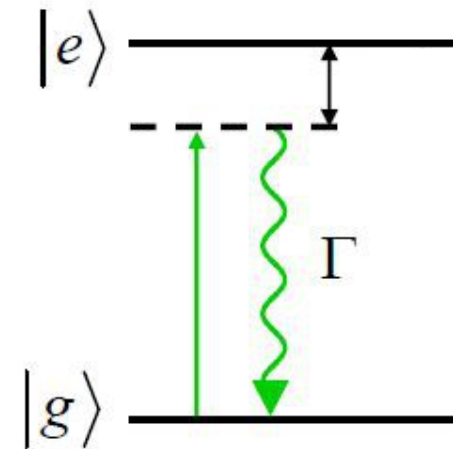
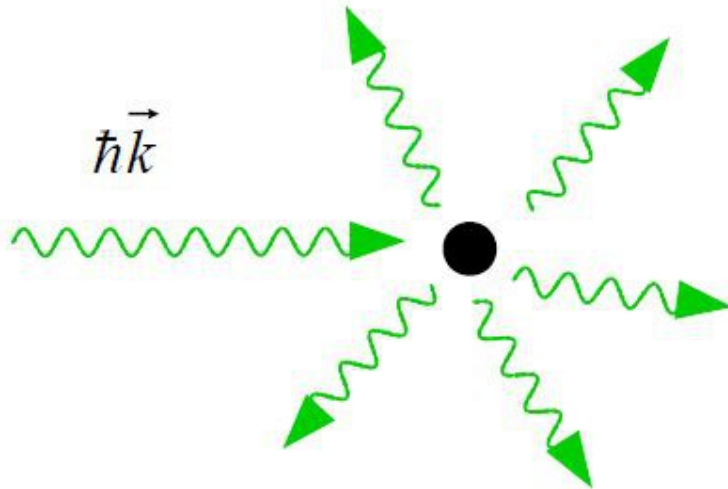


**Ako docielime, že absorbujú iba atómy
pohybujúce sa proti smeru šírenia sa laserového zväzku?
Využijme Dopplerov efekt!**

Dopplerovské laserové spomaľovanie svazku atómov

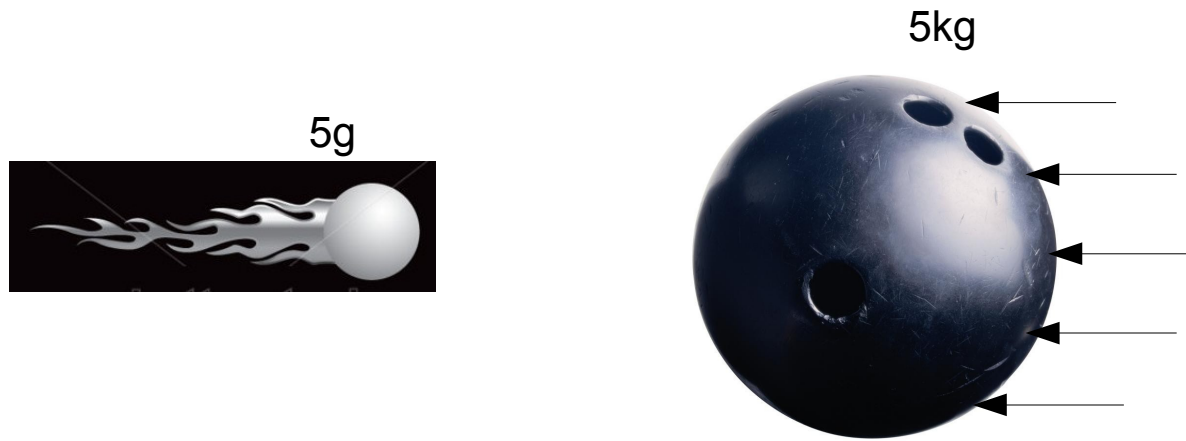


Prenos momentu hybnosti fotónu na atóm



$$\Delta \vec{p} = n \hbar \vec{k}_{abs} + \underbrace{\sum \hbar \vec{k}_{em}}_{=0}$$

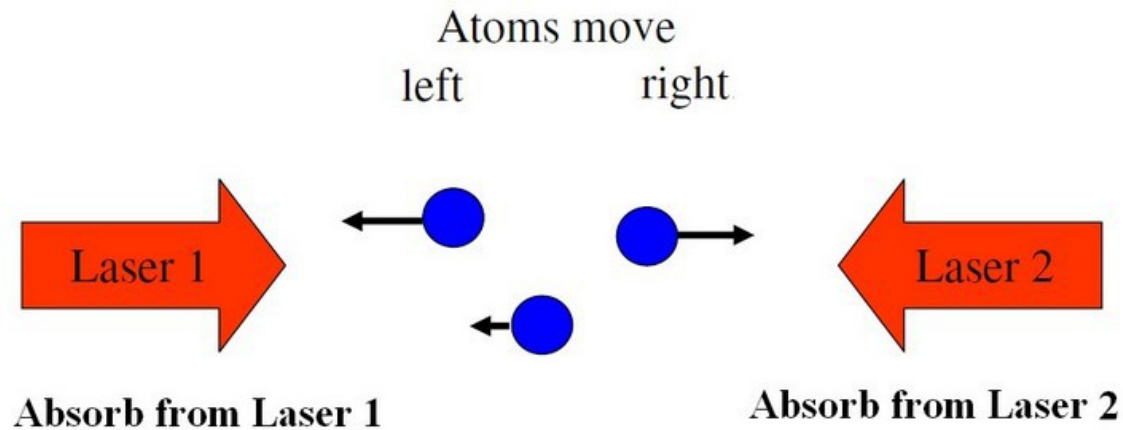
Fotón versus atóm



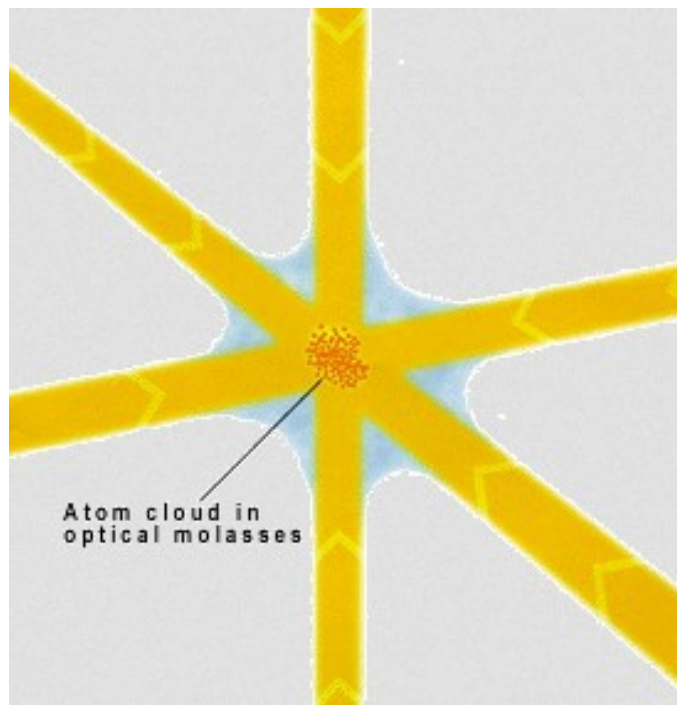
Zmena 0.01 m/s pri jednej zrážke

Pre typický prechod atómu až 10^8 zrážok!

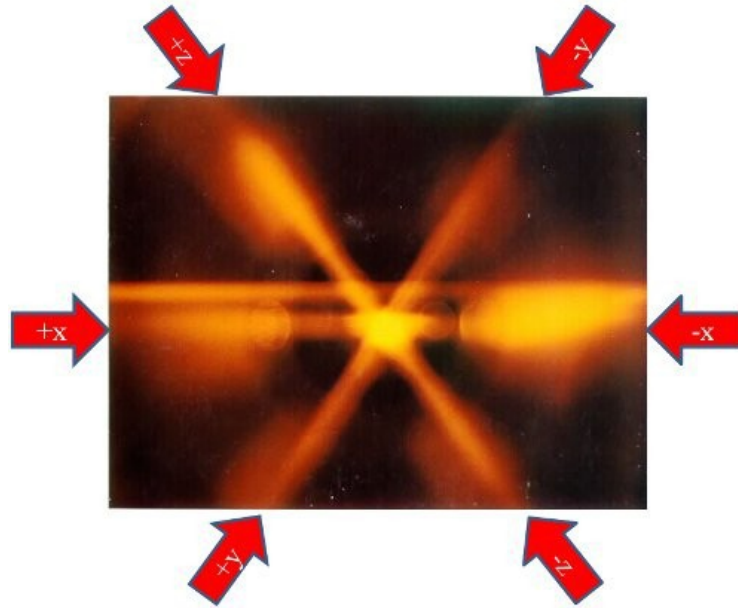
Dopplerovské laserové chladenie



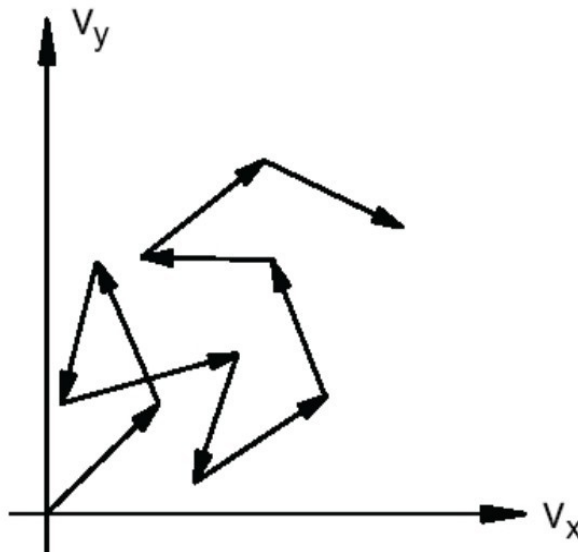
Optické molasy
– pomalá difúzia atómov



Teplotný limit Dopplerovského laserového chladenia



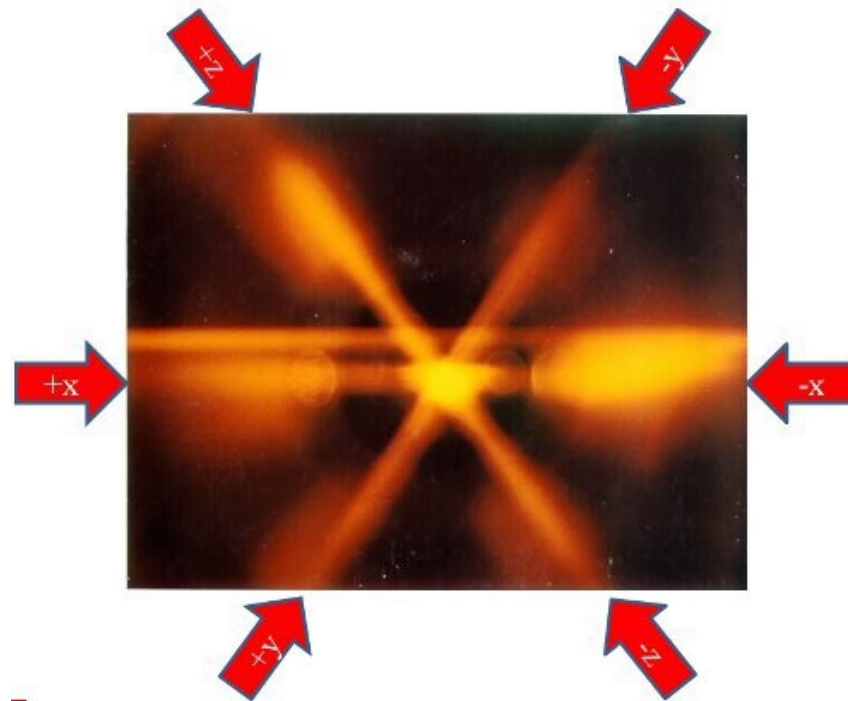
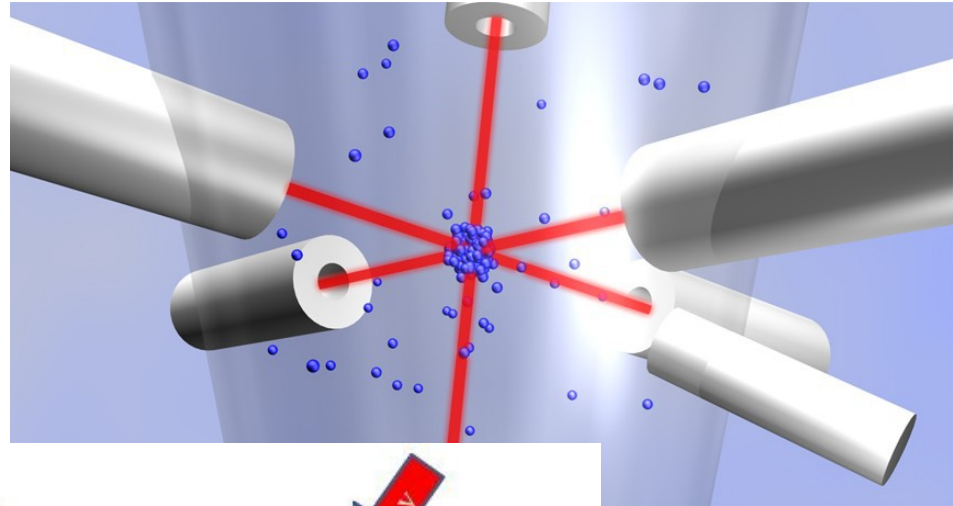
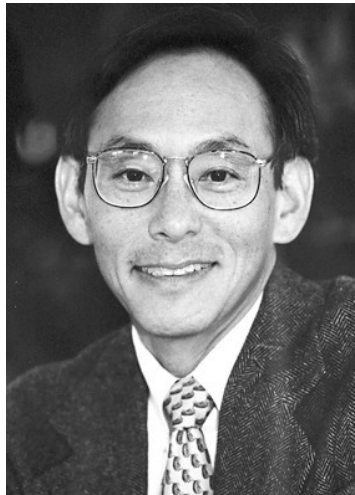
$$K_B T = \hbar \Gamma / 2$$



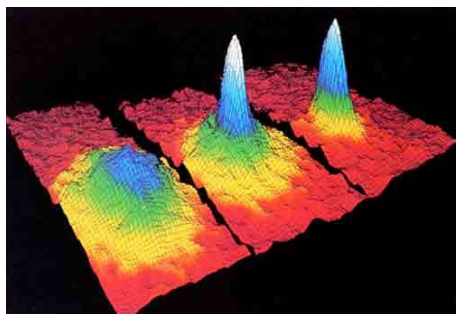
Pre atóm Na ~ 240 mikroK!



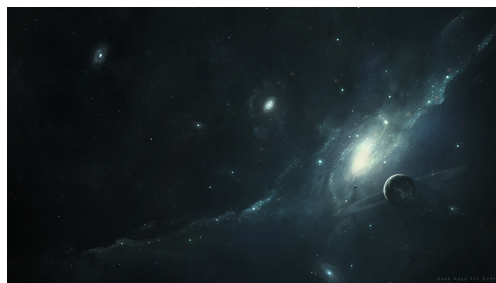
**(1997) Steven Chu, William D. Phillips
Claude Cohen-Tannoudji**



Ako dobre chladíme?



Sub-Dopplerovské
Laserové chladenie
10 nK až mikroK



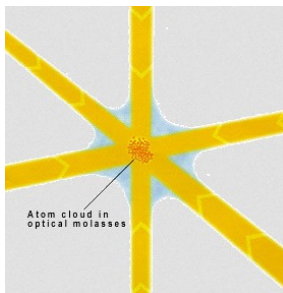
Vesmírny priestor 3 K



Tekutý dusík
77 K



Dopplerovské
laserové
chladenie
10 mikroK až 1 mK



Tekuté Hélium 4 K

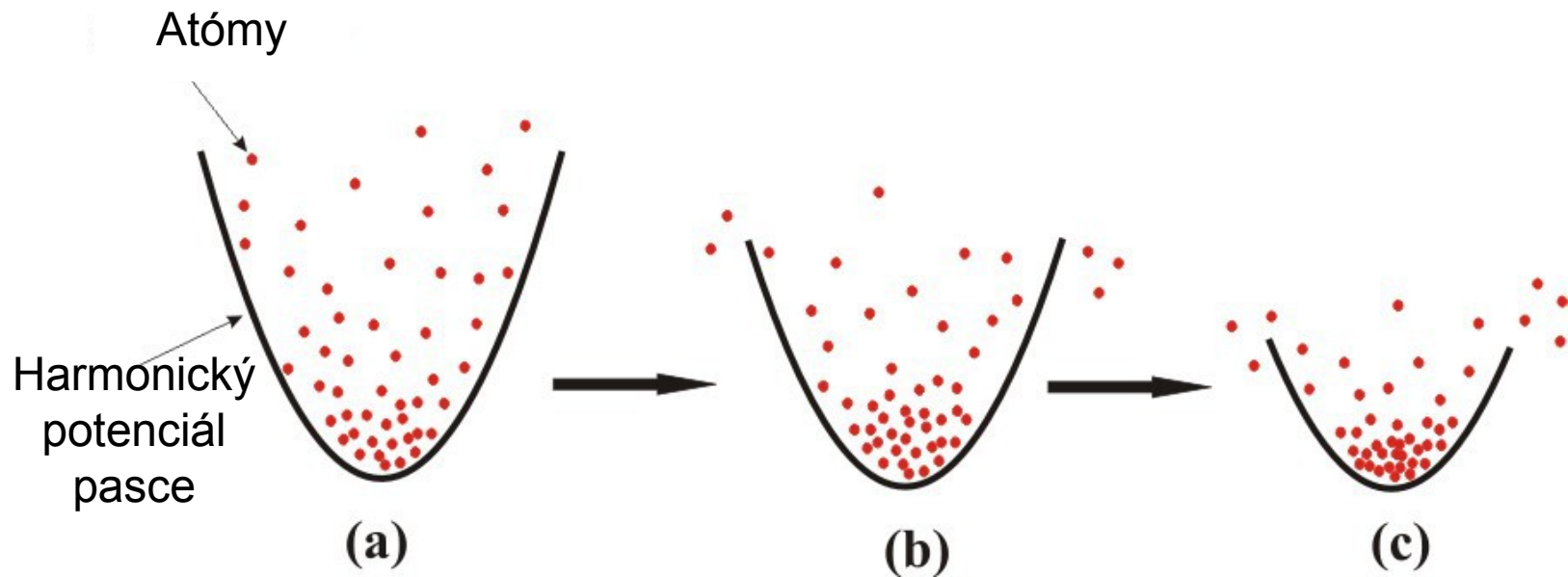


Izbová teplota 293 K

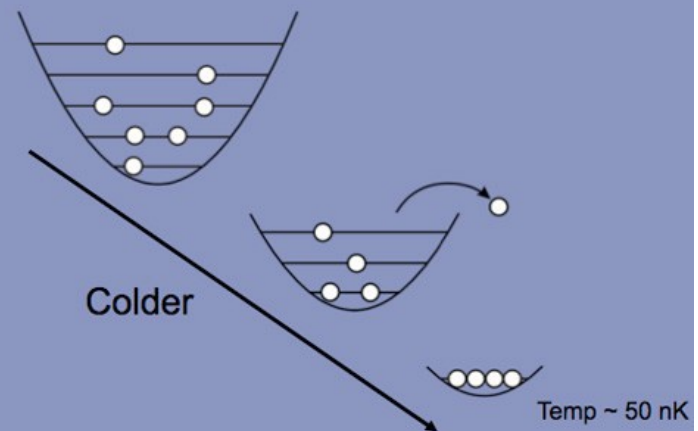


Povrch slnka
5800 K

Chladienie pod teploty odpovedajúce E_k jedného fotónu

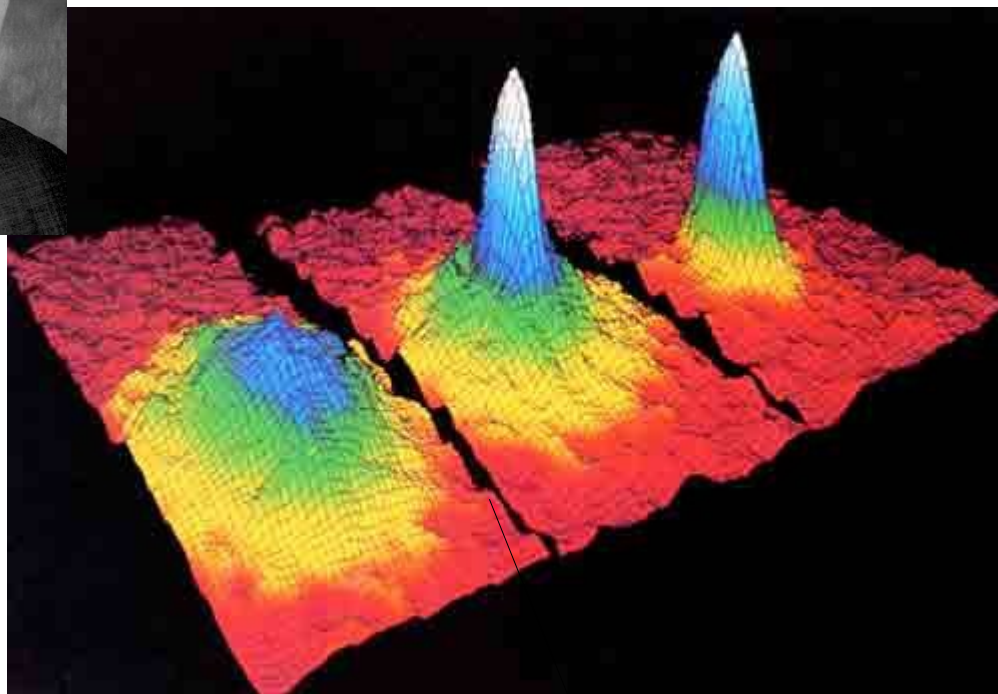
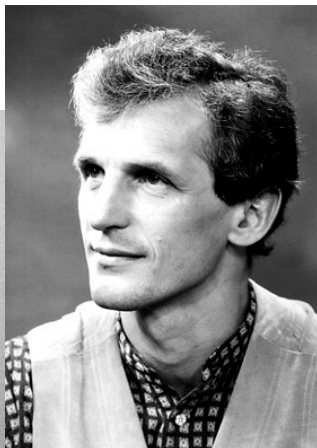


BEC: Cool by evaporation





(2001) Eric Cornell, Wolfgang Ketterle and Carl Wieman



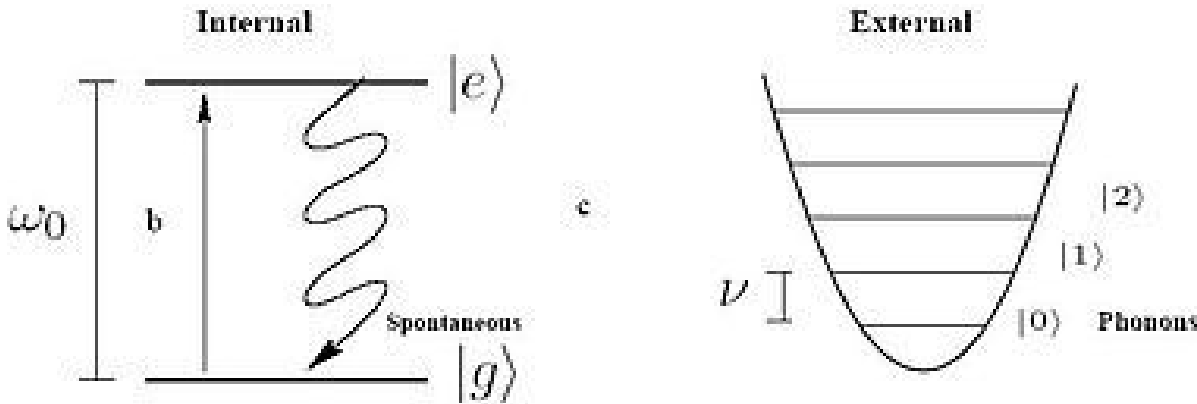
Nové skupenstvo, stav hmoty

Boseho-Einsteinové kondenzáty

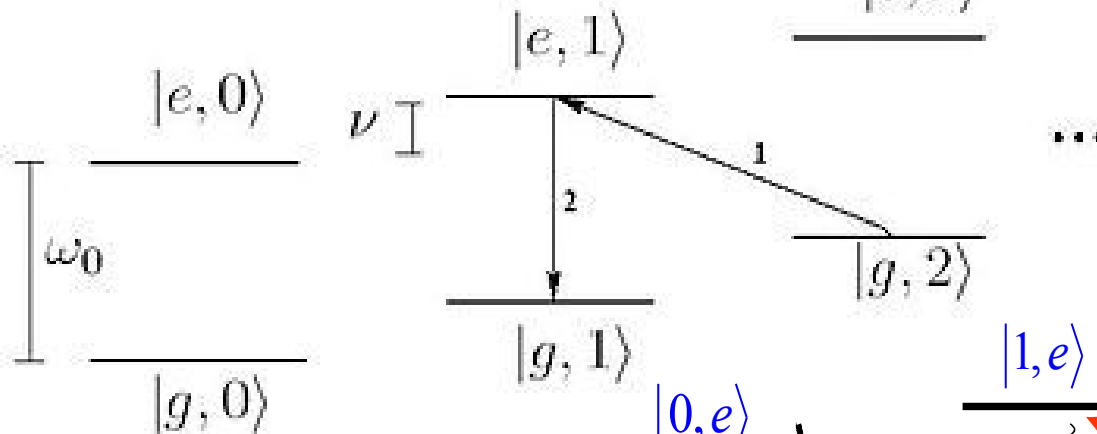


Fázový prechod

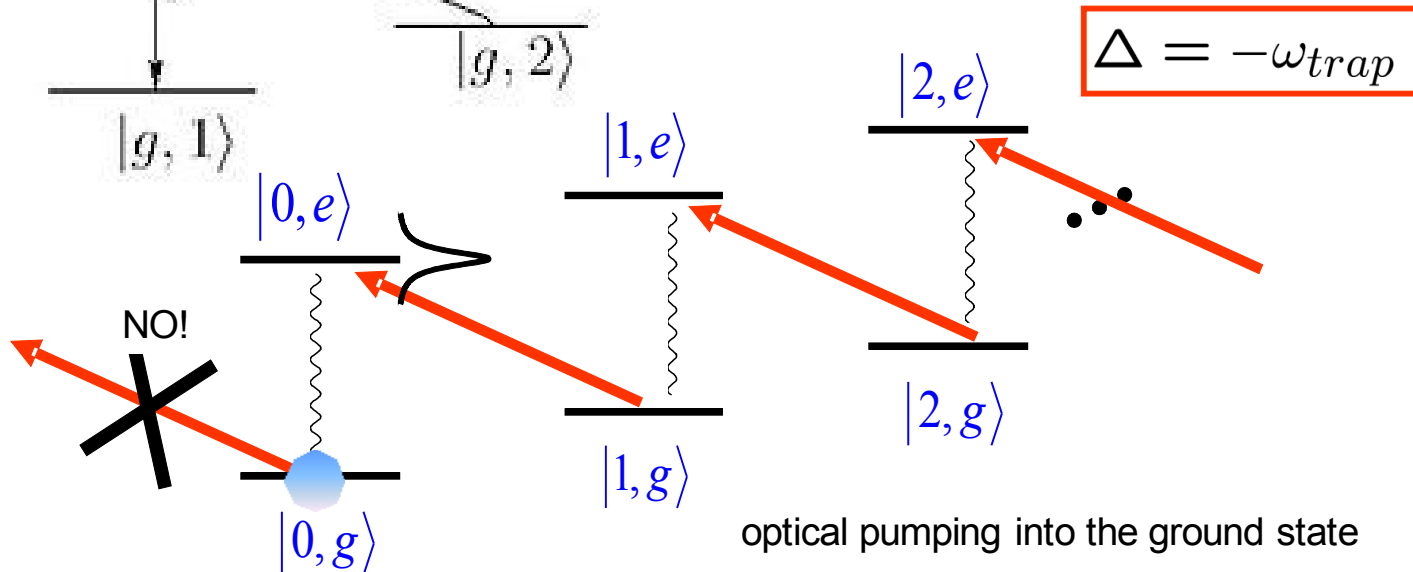
Sub-Dopplerovské chladenie iontov



Atómy, alebo ióny
v harmonickom potenciáli



Chladenie excitáciou
postranných pásiem

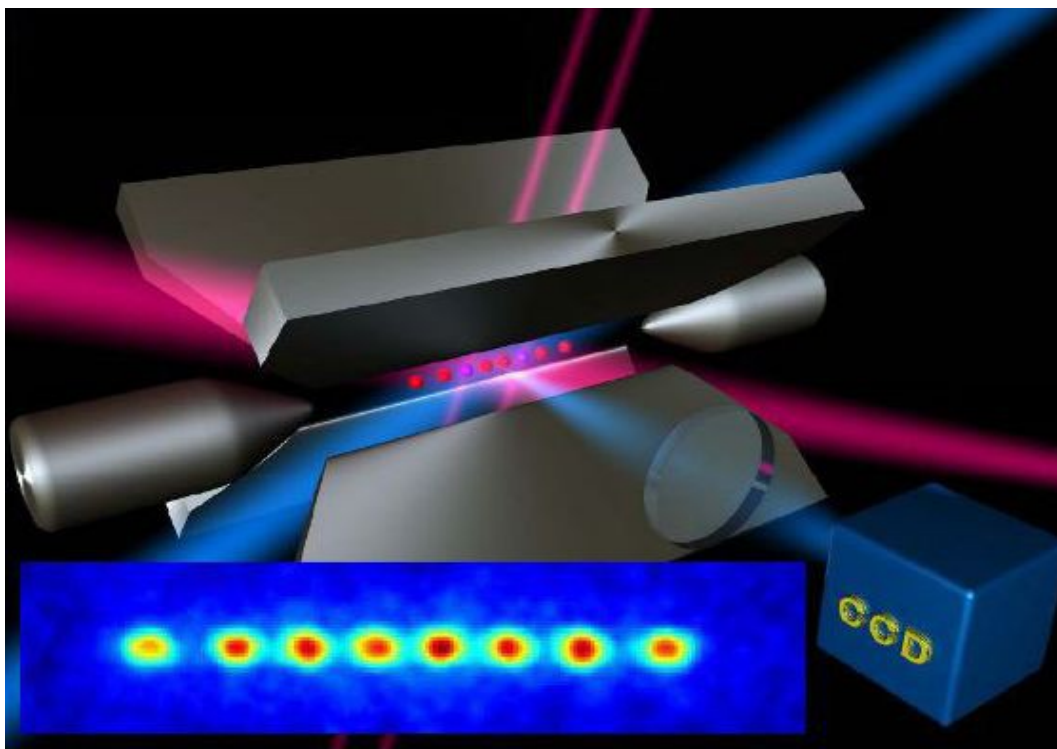
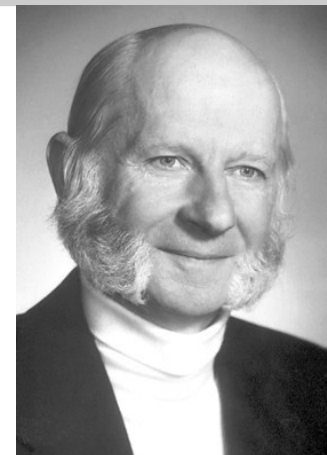




(1989) Wolfgang Paul a Hans G. Dehmelt



Lokalizácia nabitých elementárnych častíc

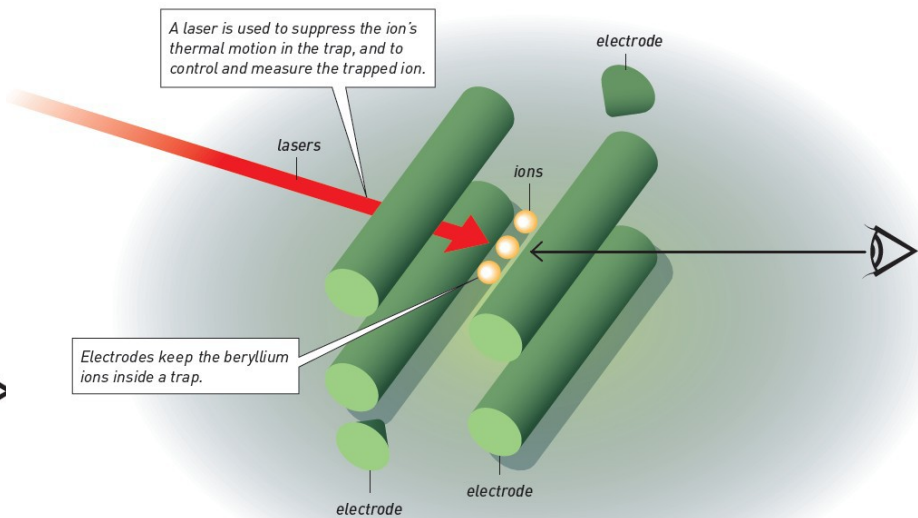
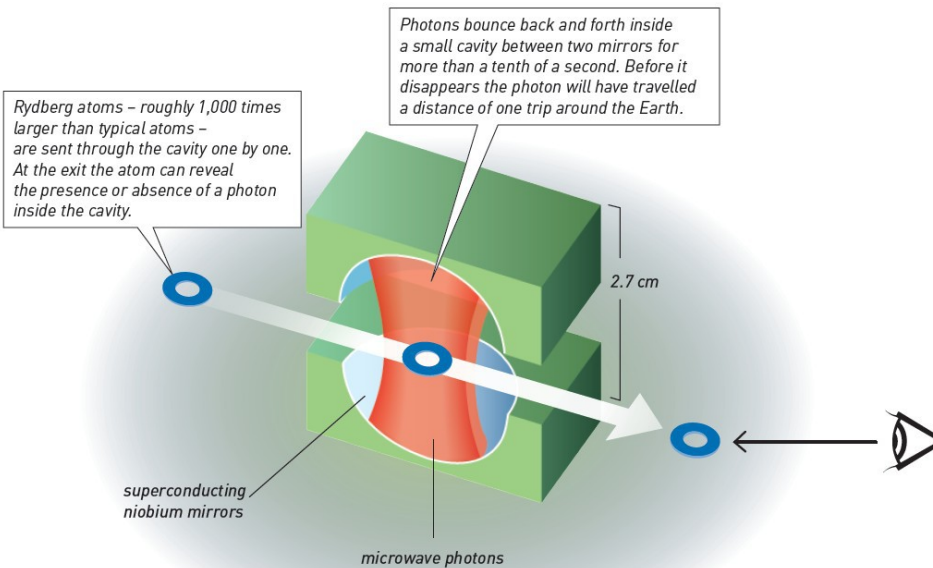
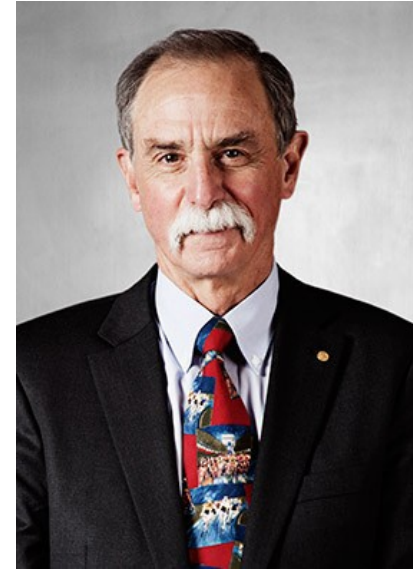
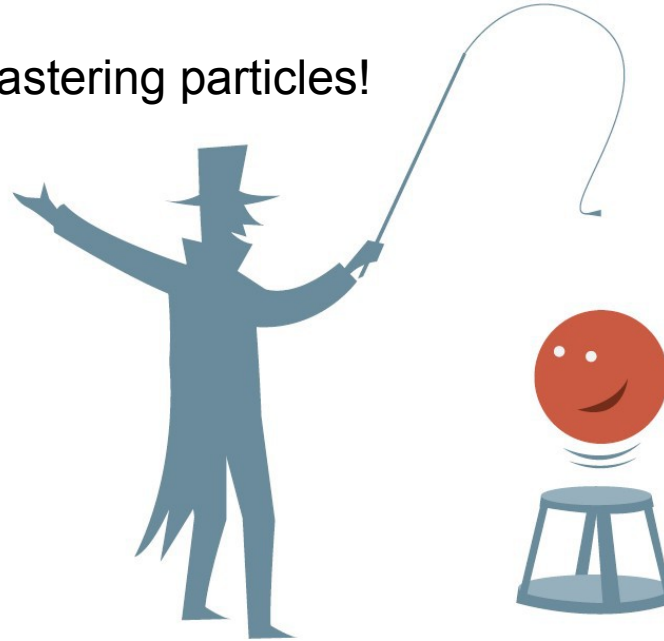




(2012) Serge Haroche and David J. Wineland

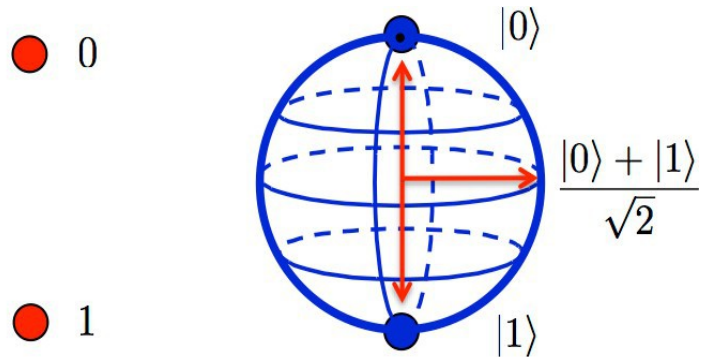


Mastering particles!



Aplikácie

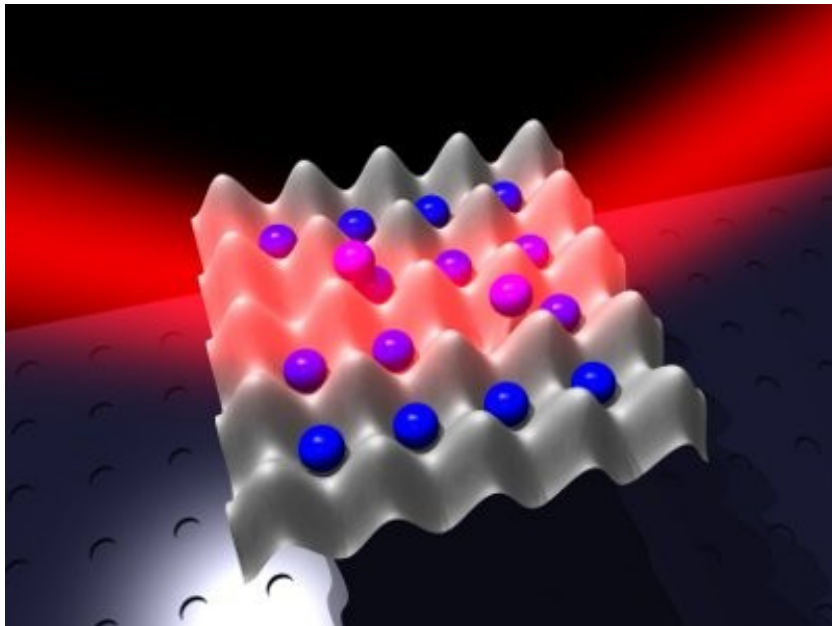
Kvantové počítanie



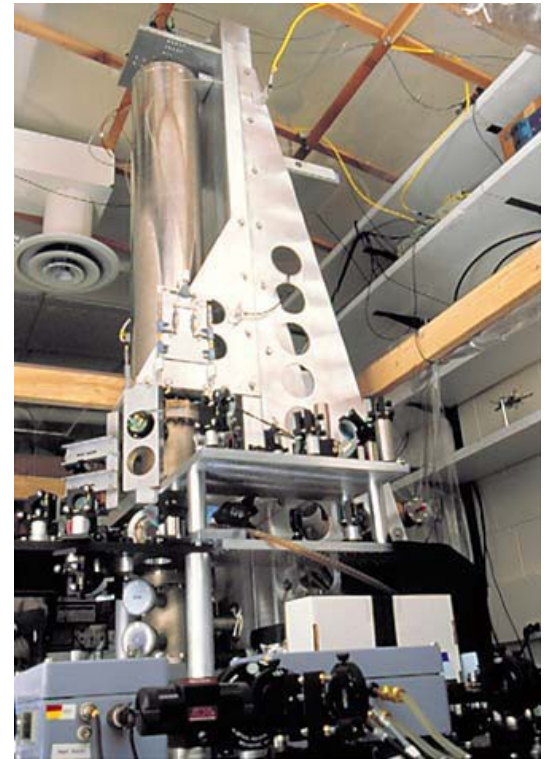
Classical Bit

Qubit

Kvantové simulácie



Presné merania a atómové hodiny

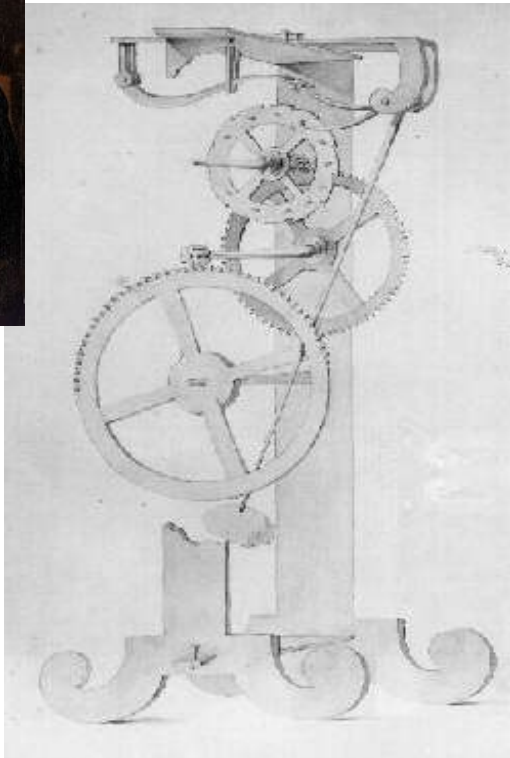


NIST F-1

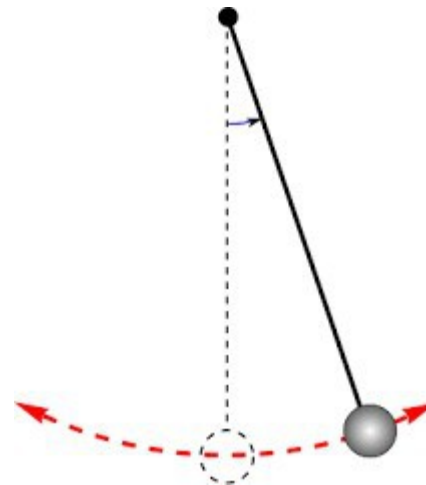
Atómové hodiny

Meranie času → počítanie kmitov oscilátora/kyvadla

Galileo Galilei
(1637)



Kyvadlové hodiny



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$



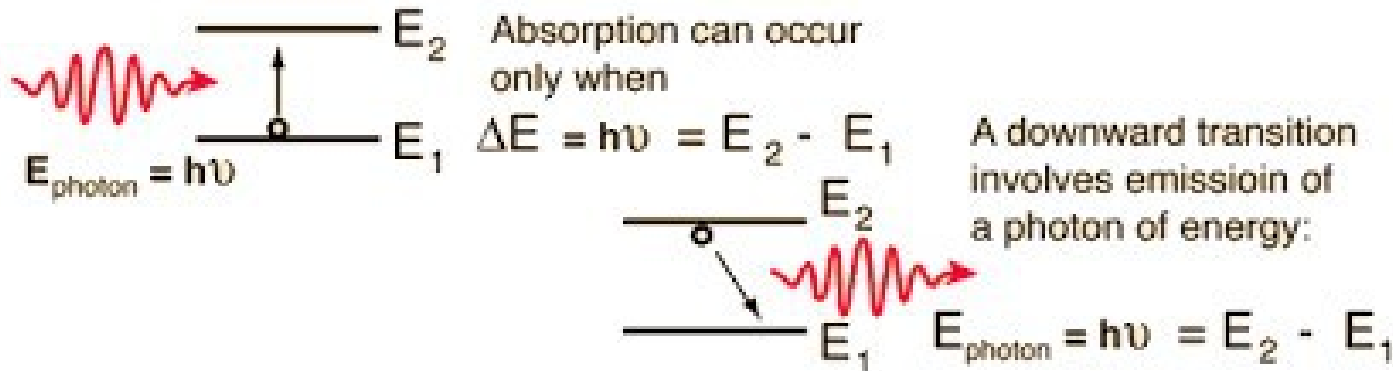
Atómové hodiny

Atómy sú perfektné oscilátory!

- vždy rovnaké vlastnosti rovnakých izotopov
- dajú sa izolovať od vonkajších vplyvov

Definícia sekundy:

Trvanie **9192631770** **periód** žiarenia odpovedajúceho prechodu medzi dvoma hyperjemnými hladinami základného stavu atómu ^{133}Cs

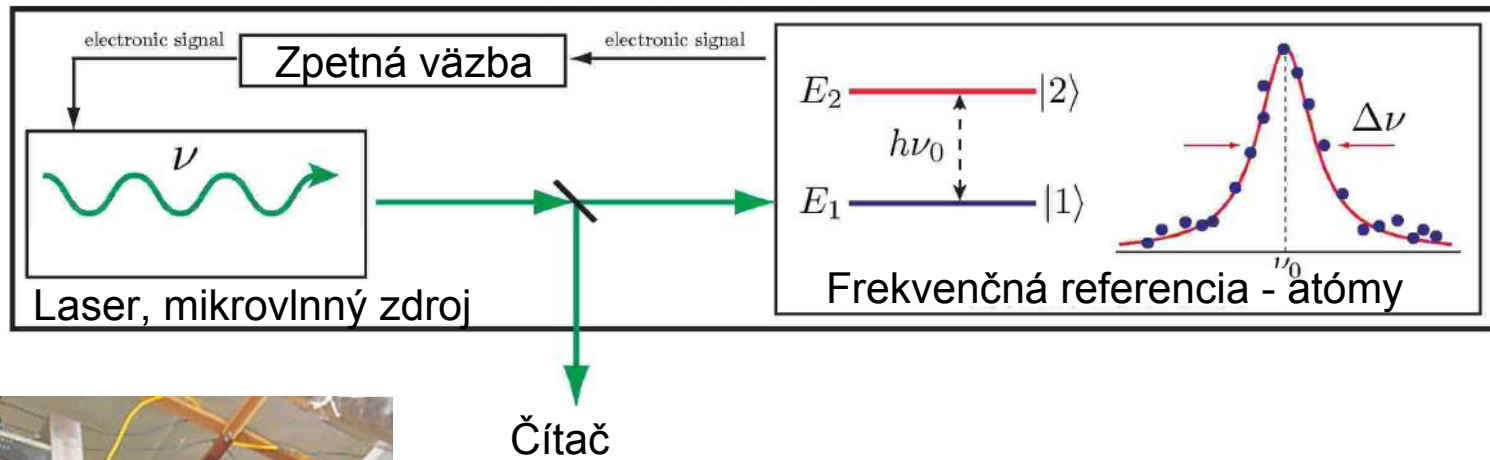


Ak chceme oscilátor s dobre definovanou frekvenciou

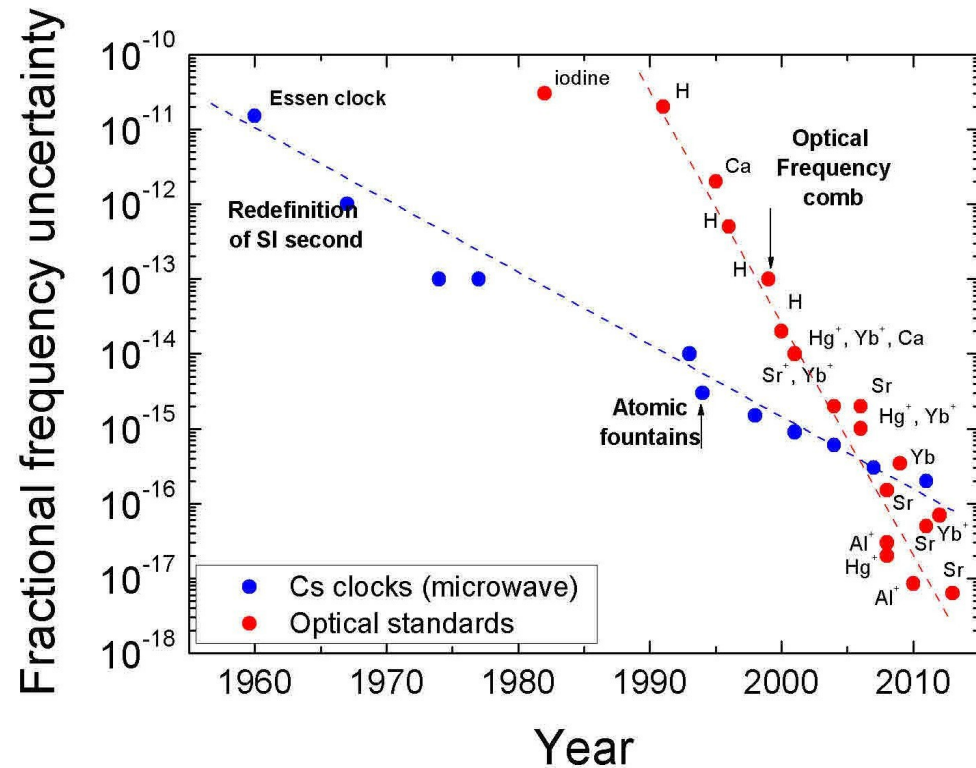
-> potreba minimalizovať posuvy spôsobené pohybom atómov!

- spresnenie definície SI sekundy (1997): „zodpovedá prechodu cézia v jeho základnom stave pri teplote 0 K“

Atómové hodiny - princíp

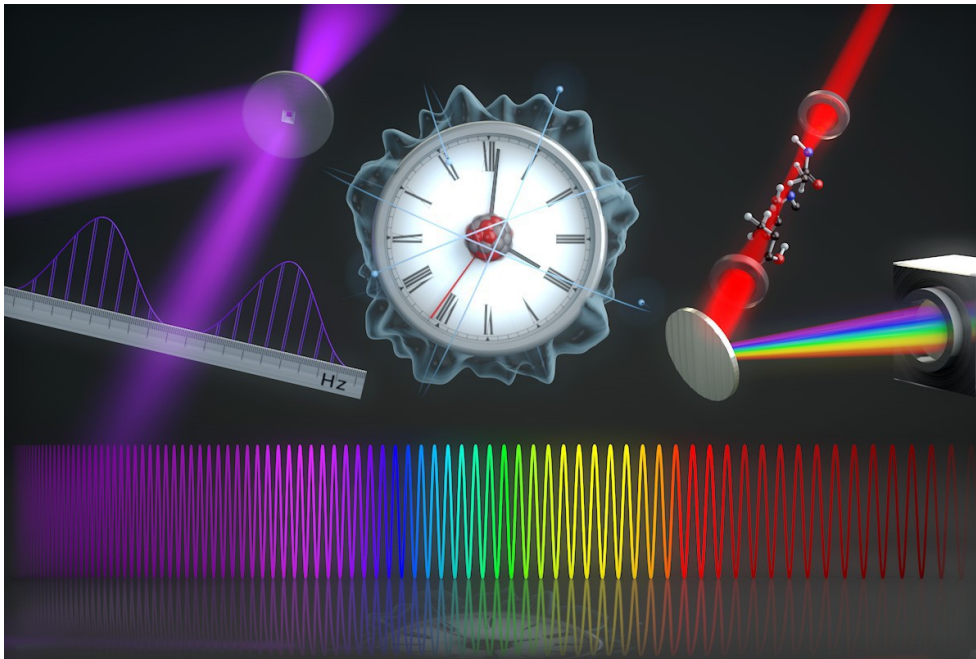
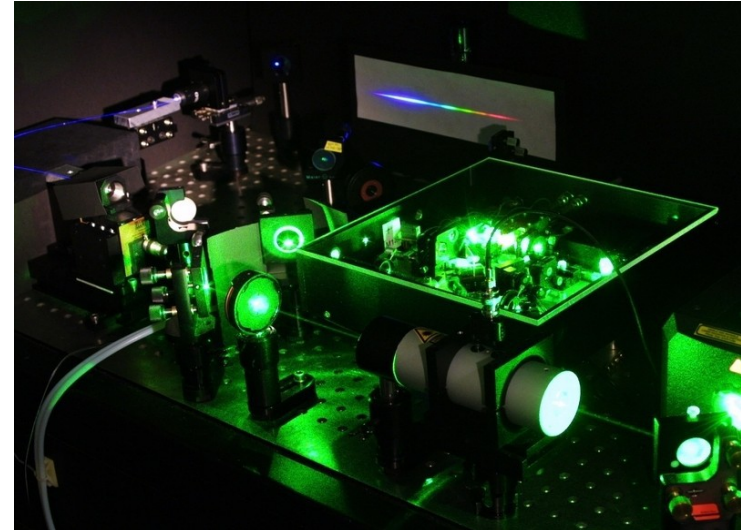


Nepresnosť
1 sekunda
za 60
miliónov
rokov





(2005) John L. Hall a Theodor W. Hänsch



Najpresnejšie merania vo vede sú merania frekvencie!

Meranie času ~ počítanie kmitov oscilátoru

Relatívna neurčitosť merania fyzikálnych veličín

SI Base Unit	Physical Quantity	Uncertainty
Candela	Luminous intensity	1×10^{-4}
Kelvin	Temperature	3×10^{-7}
Mole	Amount of substance	8×10^{-8}
Ampere	Electric current	4×10^{-8}
Kilogram	Mass	1×10^{-8}
Meter	Length	1×10^{-12}
Second	Time interval	1×10^{-15}

Redefinícia sekundy?

Pravdepodobne rok 2018



NATURE | NEWS



Precise atomic clock may redefine time

Device lays the groundwork for a new second.

Philip Ball

09 July 2013

[Rights & Permissions](#)

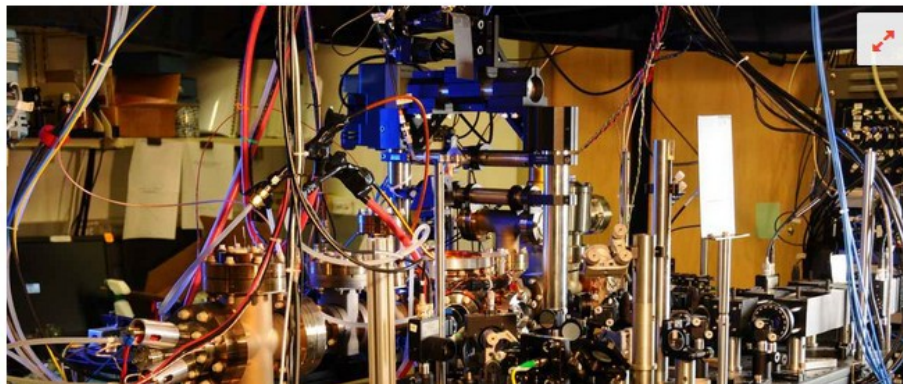
The international definition of a second could be heading for a change, thanks to researchers who have demonstrated an advanced type of 'atomic clock' with the precision and stability needed to replace the current standard.

SCIENCE

THE WORLD'S MOST PRECISE CLOCKS: 100 TIMES MORE PRECISE THAN CESIUM ATOMIC CLOCKS

AND THEY'RE ABOUT 10 BILLION TIMES MORE PRECISE THAN YOUR QUARTZ WRISTWATCH.

By Francie Diep Posted August 22, 2013



WANT MORE NEWS LIKE THIS?

Sign up to receive our weekly email newsletter and never miss an update!

Enter email address

SIGN UP

By submitting above, you agree to our privacy policy.

Related Content

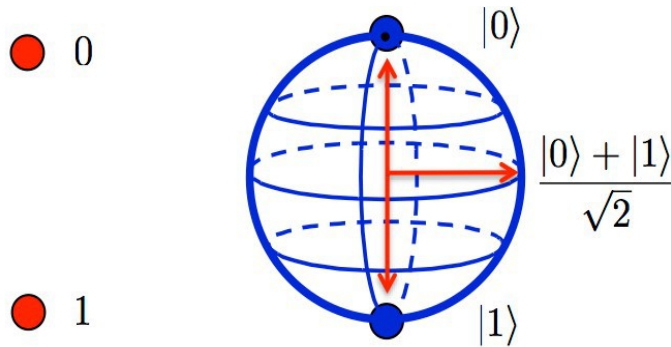
Kvantové počítanie s atómami

Kvantový počítač:

- vykonáva logické operácie a výpočty na základe zákonov kvantovej mechaniky (superpozícia, nelokalita)
- významné výpočtové úlohy, pre ktoré je výpočet na kvantovom počítači dramaticky rýchlejší



R. Feynman (1982)

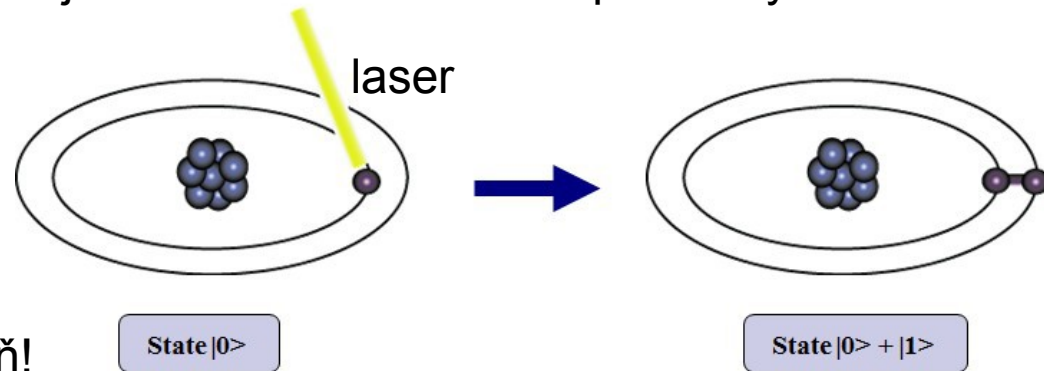


Klasický bit

Kvantový bit

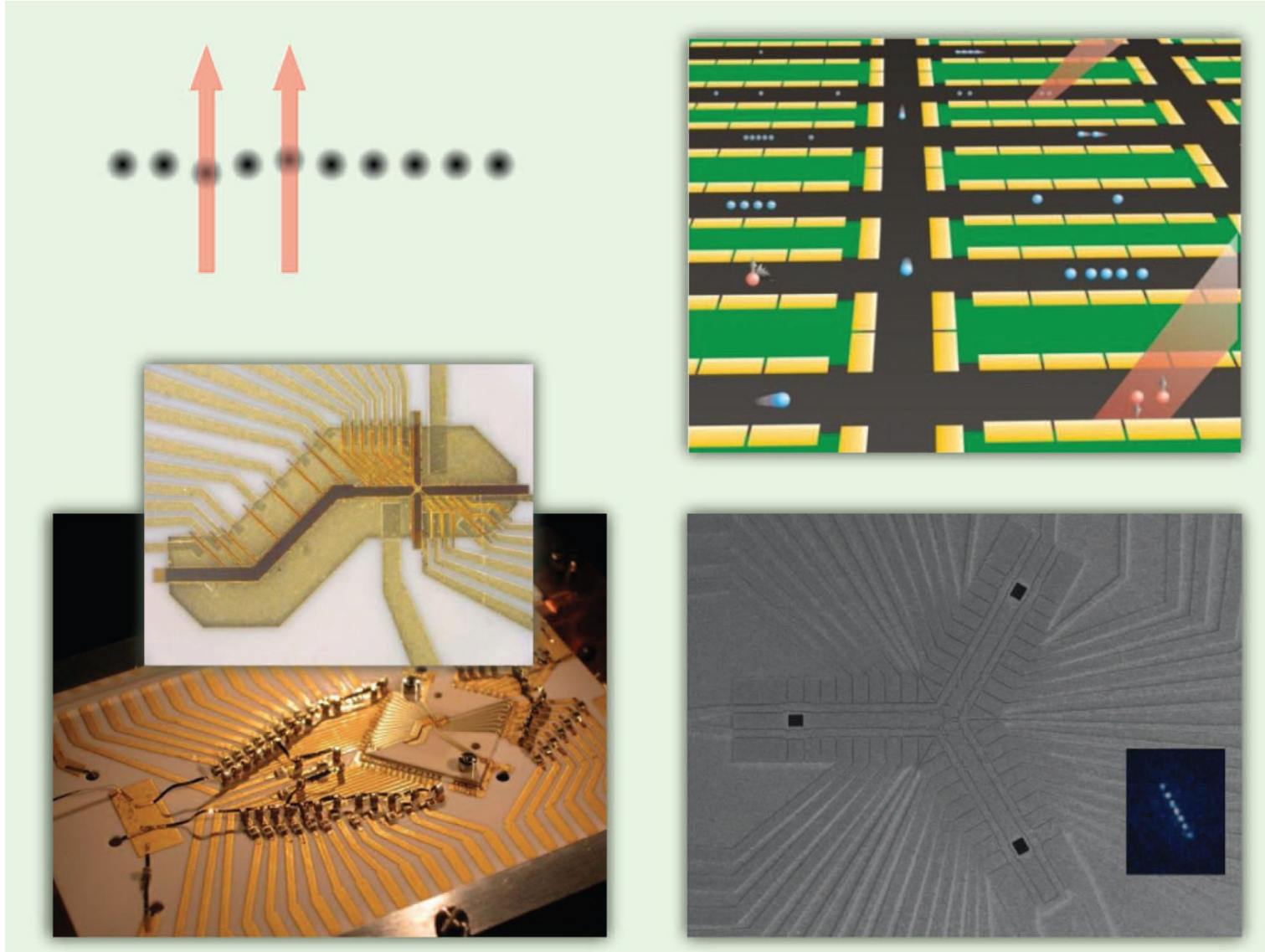
2^n stavov, na ktorých robíme požadovanú logickú operáciu zároveň!

Chyba uloženia informácie do kvantového bitu je extrémne závislá na teplote a rýchlosti atómu!

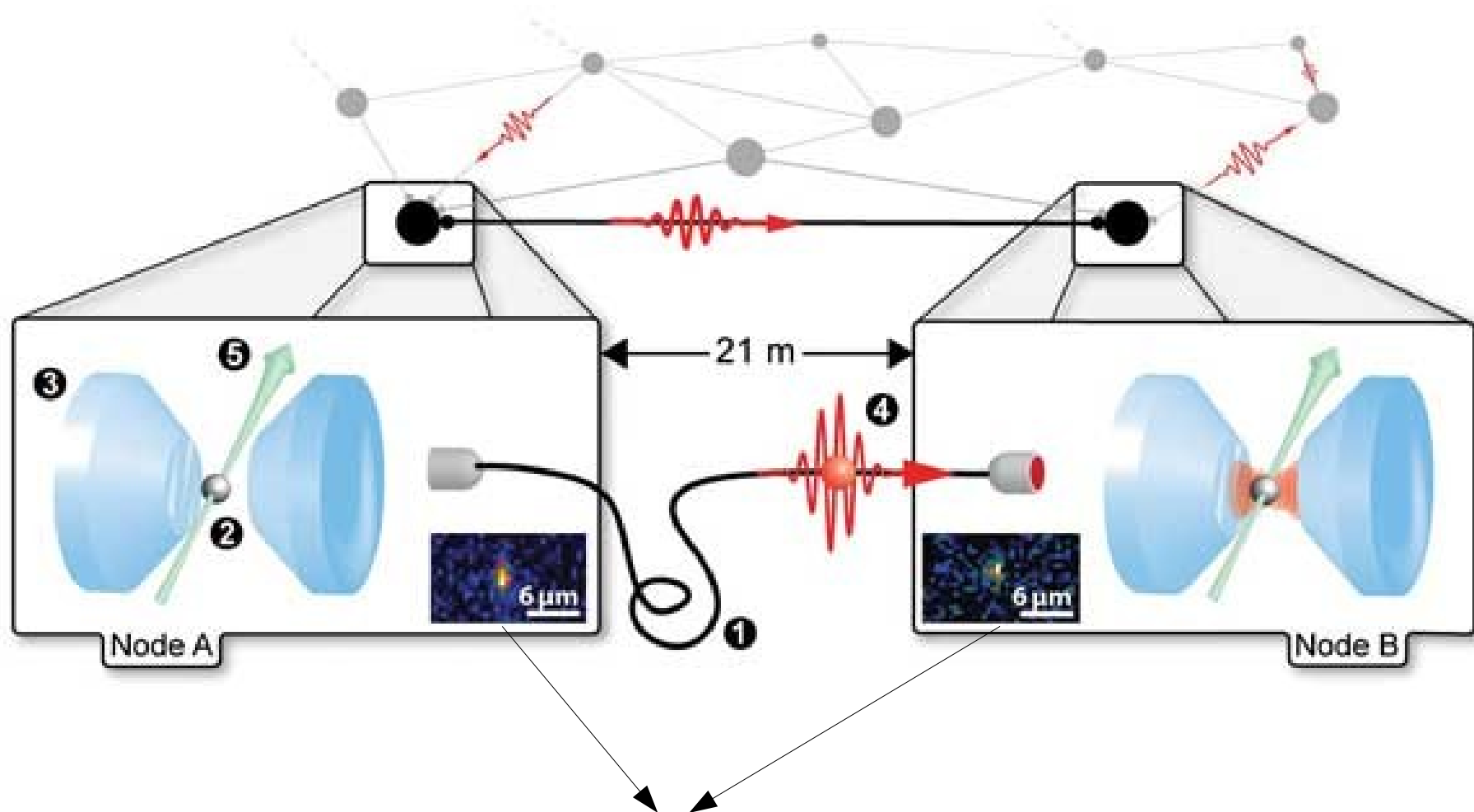


Kvantové počítanie s atómami

Kielpinsky, Monroe, Wineland (NIST)



Kvantová komunikácia s atómami



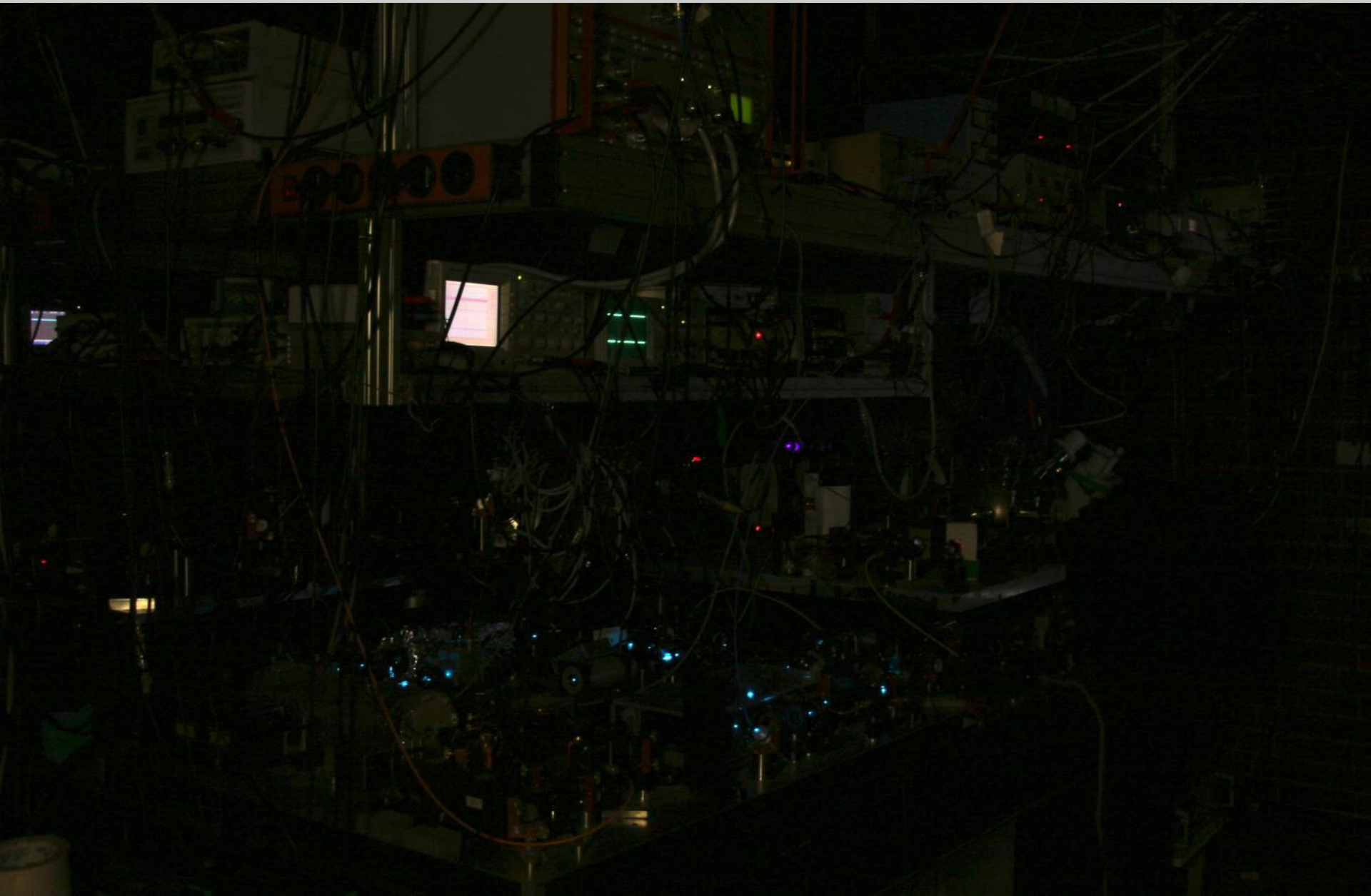
Atómy musia byť blízko $T=0\text{K}$, inak bude interakcia so svetlom neefektívna!

Predstavenie laboratória

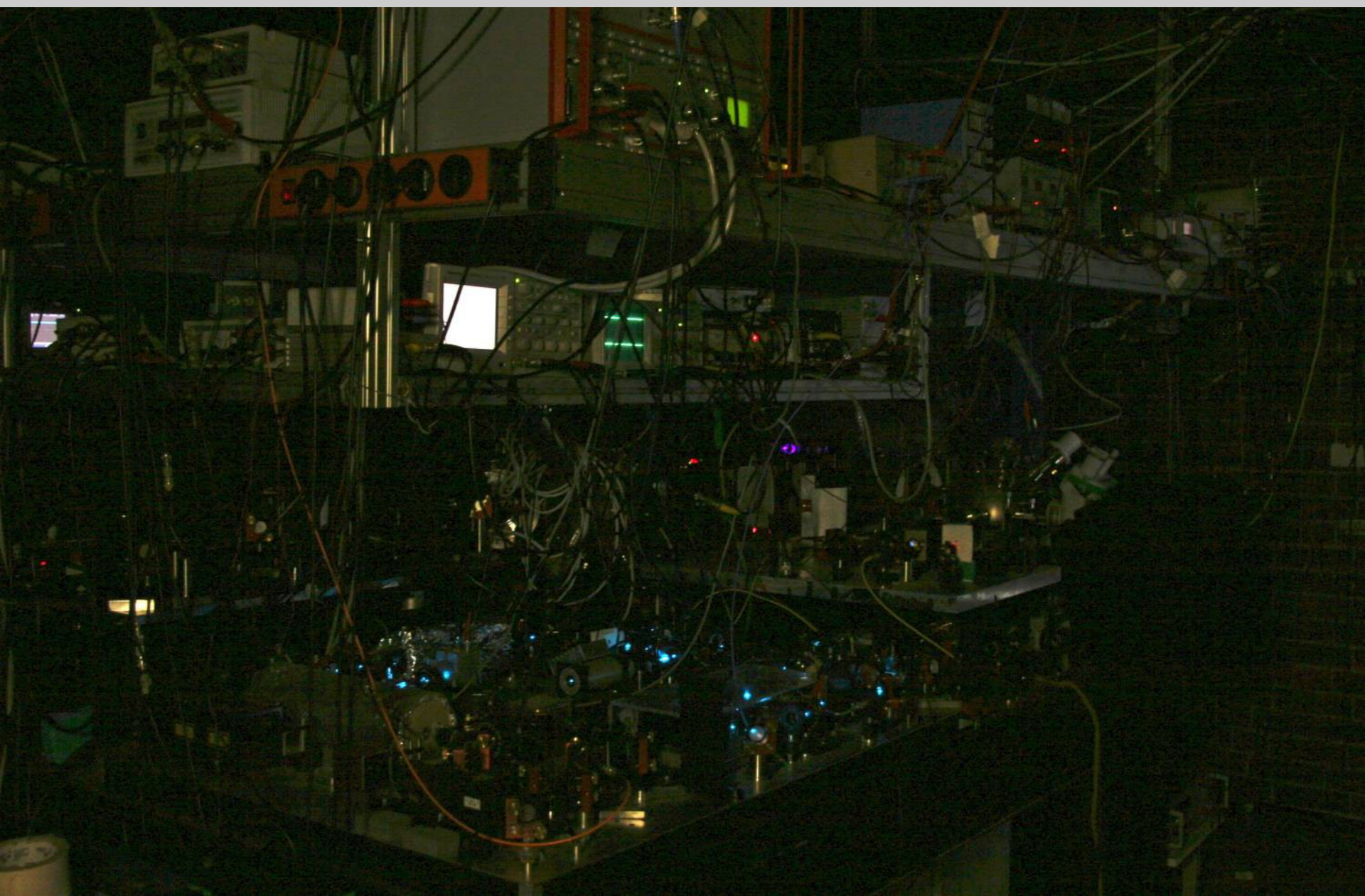


Detektory schopné zadetekovať
jednotlivé svetelné kvantá - fotóny

Predstavenie laboratória



Predstavenie laboratória



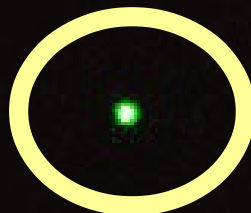
Predstavenie laboratória

Pozorovanie jedného izolovaného atómu!

We never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought-experiments we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences.

E. Schrödinger

British Journal of the Philosophy
of Science III (10), (1952)



Čo vlastne vidíme?

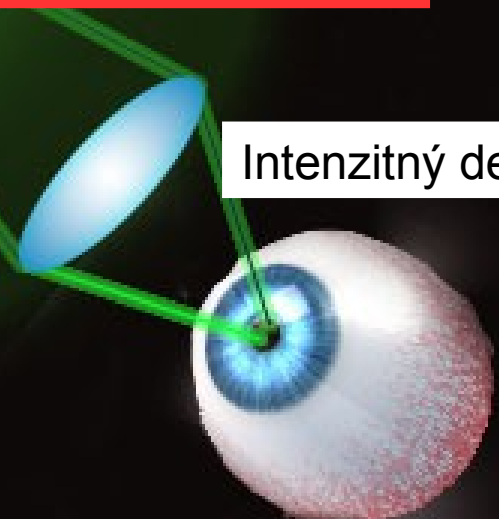
Pozorovanie jediného atómu vo voľnom priestore (vákuu)

Pozorovanie rozptýlených fotónov...

- kvantové skoky
- experimenty skúmajúce interakciu svetla a látky
- chladenie atómov
- metrológia a ultra-presné merania
- ...

Excitačný zväzok

Intenzitný detektor

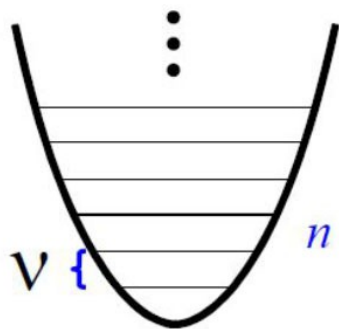


Jediný atóm so štruktúrou hladín

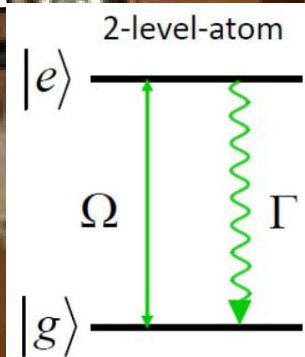


Generácia 3D potenciálu – Pauliho past

Harmonický potenciál

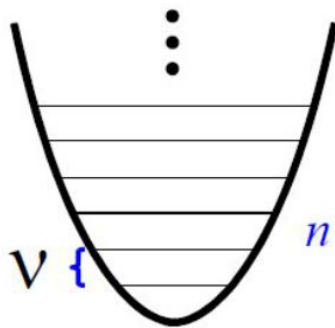


Jediný atóm so štruktúrou hladín



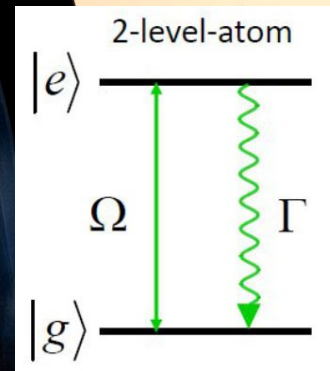
Generace 3D potenciálu – Pauliho past

Harmonický potenciál



Tlak $\sim 10^{-11}$ mBar
Stredná dráha voľného
letu atómu $\sim 10^4$ km

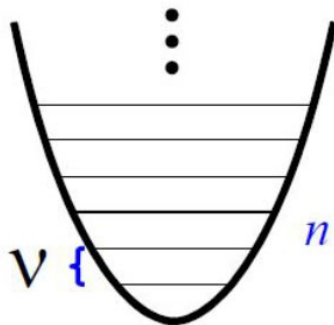
Jediný nabitý atóm



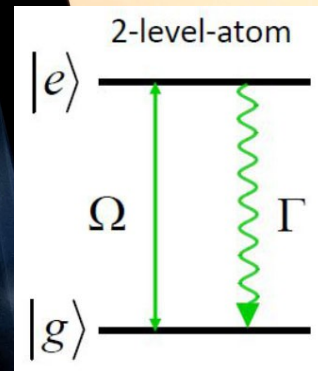
Vákuová aparatúra a magnetické stienenie
- izolácia od okolitého prostredia

Generace 3D potenciálu – Pauliho past

Harmonický potenciál



Jediný nabitý atóm

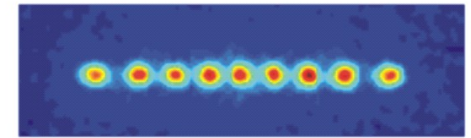
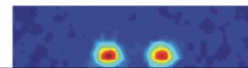
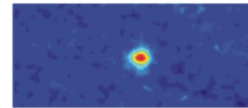
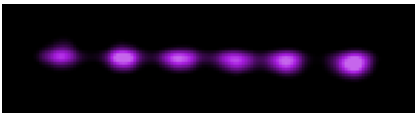


Vákuová aparátúra a magnetické stienenie
- izolácia od okolitého prostredia

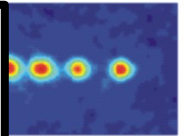
Excitujúci laserový sväzok

Lasery môžu chladit' elementárne častice veľmi dobre!

Oxford, England: $^{40}\text{Ca}^+$



Boulder

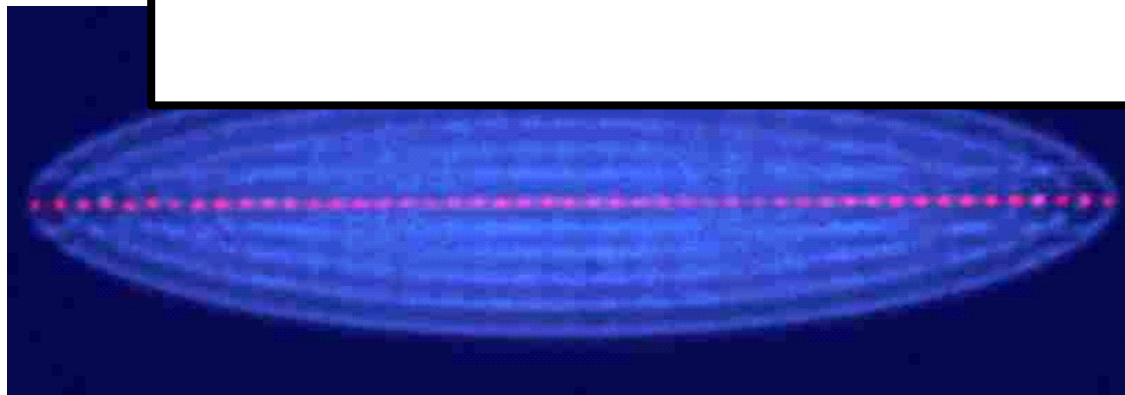


tria: $^{40}\text{Ca}^+$

Navštívte naše laboratóriá na katedre optiky, 4. poschodie!

**Realizácie kvantových procesorov s jednotlivými fotónmi
Svetlo spomalené pomovou atómových obláčikov**

(AV ČR)



Aarhus, Denmark: $^{40}\text{Ca}^+$ (red) and $^{24}\text{Mg}^+$ (blue)

