离子阱物理简介

林毅恒

Spin.ustc.edu.cn

2020/10

林毅恒 简介：

•0504

•2015年美国科罗拉多大学博尔德分校（CU Boulder）物理学博士
离子阱量子信息处理实验研究

•2018年回校，加入杜江峰院士带领的中科院微观磁共振重点实验室。

•正在搭建离子阱量子信息处理实验平台
•远期目标是实验演示多离子的量子模拟和量子计算

•QQ: 326120109
•实验室主页：spin.ustc.edu.cn

内容

- 背景介绍
- 自组织的离子链
- 光与离子的相互作用
- 量子计算和量子模拟

量子信息：比特

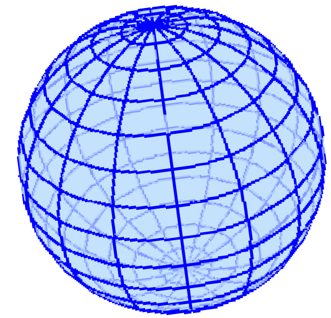
信息储存在两个量子态和相位和布局上

$$\Psi = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$$

归一化：

$$\sum_{i,j\ldots} |C_{i,j\ldots}|^2 = 1$$

$|0\rangle$



$|1\rangle$

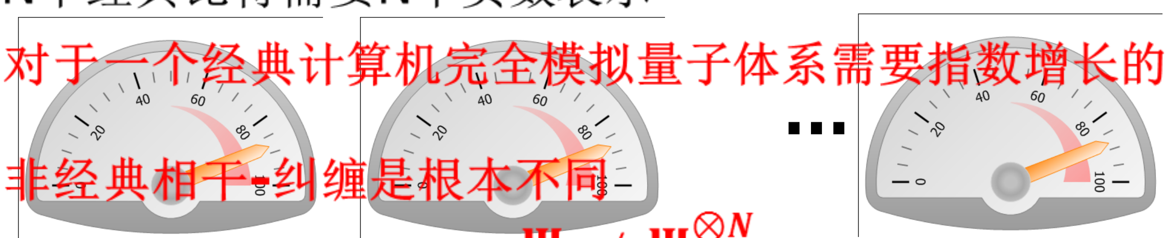
两比特纯态需要四个复数完全表示，自由度为6

$$\Psi = C_{00}|00\rangle + C_{01}|01\rangle + C_{10}|10\rangle + C_{11}|11\rangle$$

N个量子比特需要$2^{N+1}-2$个实数表示

N个经典比特需要N个实数表示

对于一个经典计算机完全模拟量子体系需要指数增长的资源



非经典相干-纠缠是根本不同

$$\Psi_N \neq \Psi_i^{\otimes N}$$

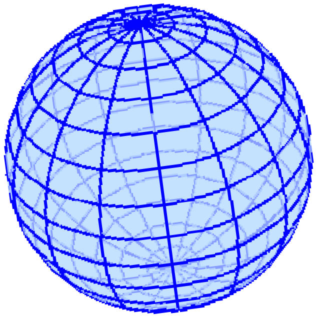
量子信息：比特

信息储存在两个量子态和相位和布局上

$$\Psi = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$$

归一化：
$$\sum_{i,j\ldots} |C_{i,j\ldots}|^2 = 1$$

$|0\rangle$



$|1\rangle$

两比特纯态需要四个复数完全表示，自由度为6

$$\Psi = C_{00}|00\rangle + C_{01}|01\rangle + C_{10}|10\rangle + C_{11}|11\rangle$$

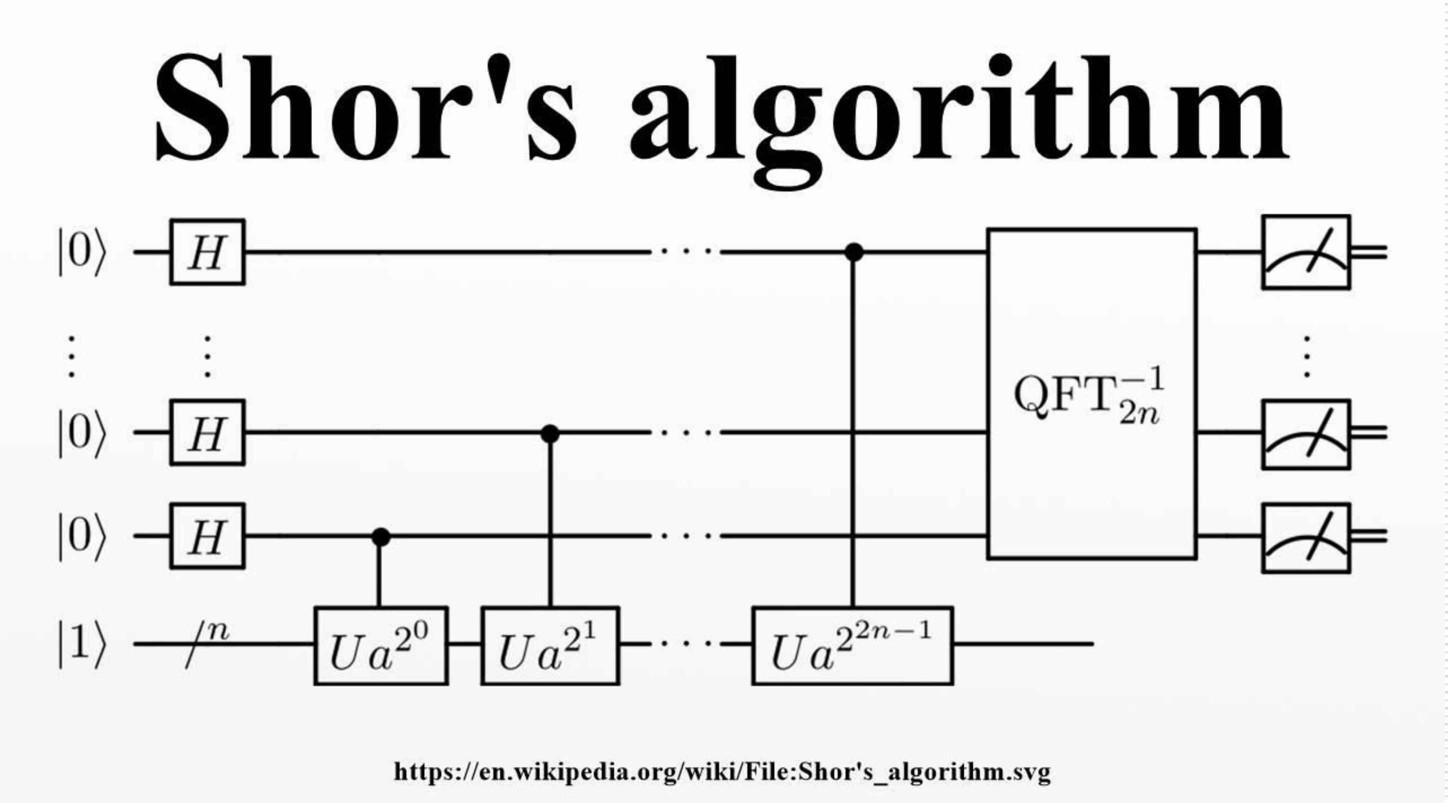
N个量子比特需要$2^{N+1}-2$个实数表示
N个经典比特需要N个实数表示

纠缠态例子

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \neq \Psi_{\text{qubit 1}} \otimes \Psi_{\text{qubit 2}}$$

非经典相干-纠缠很关键

典型的量子计算过程



初态 单比特门 多比特操作 读出

量子模拟

Richard P. Feynman

Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy

实验得出结果

哈密顿量，待测物理量

待模拟问题

可能应用：求解分子基态，优化问题，人工智能，凝聚态模型......

."Simulating Physics with Computers", *International Journal of Theoretical Physics*, volume 21, 1982, p. 467-488, at p. 486

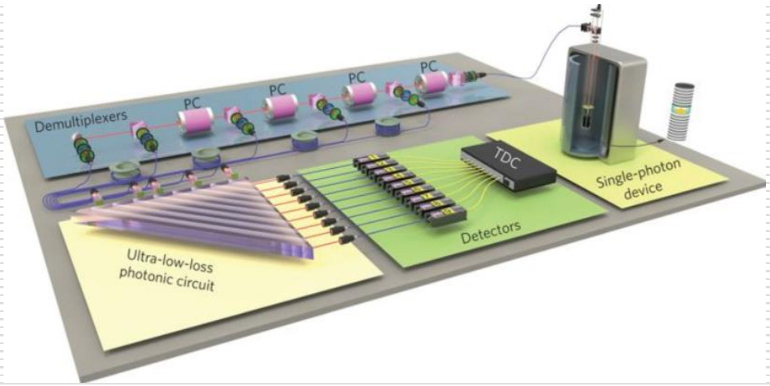
"...we never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought experiments, we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences ...."

我们从没有在一个电子，一个原子或一个（小）分子上做实验。在思想实验里，我们优势假设我们可以这样做；这总是有奇怪的后果......

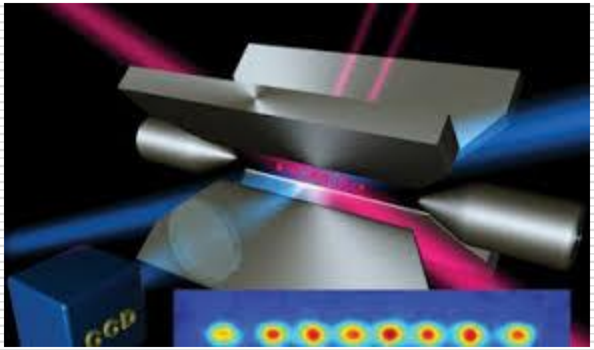
-- 薛定谔，1952

E., Brit. J. Phil. Sci. III, 109, (1952)

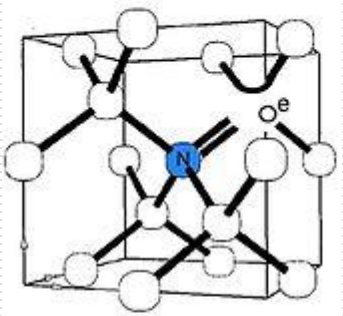
物理实现



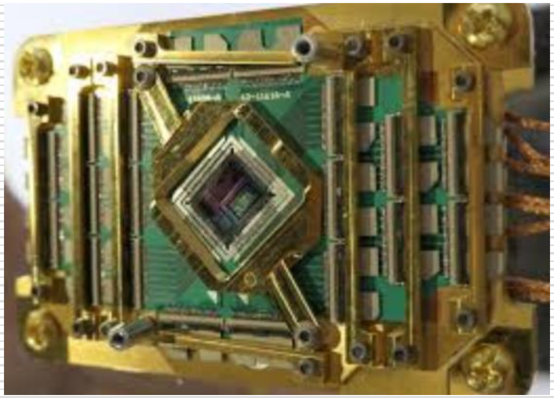
光子



离子阱



固态量子点

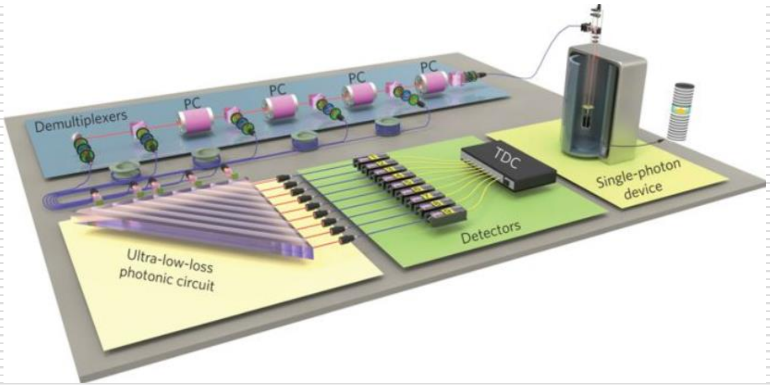


超导量子比特

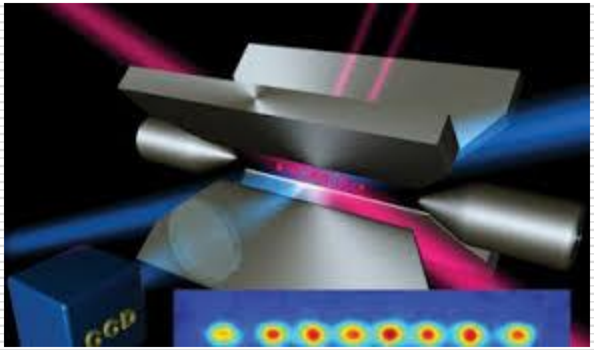
……

Nature **volume464**, pages45–53 (04 March 2010)
Nature Photonics **volume11**, pages361–365 (2017)

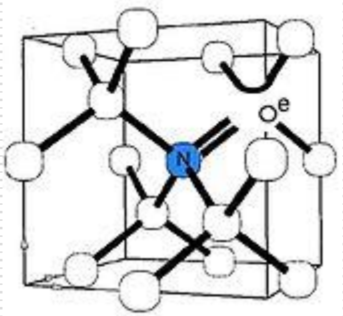
物理实现



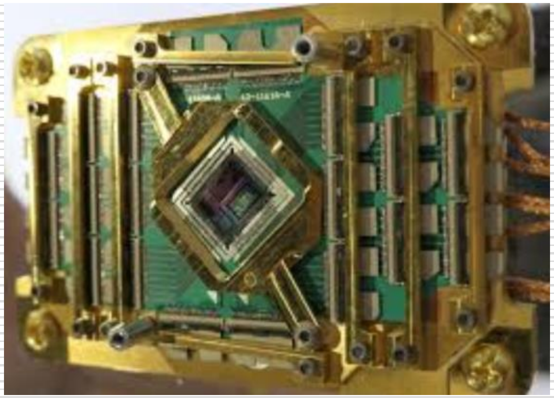
光子



离子阱



固态量子点



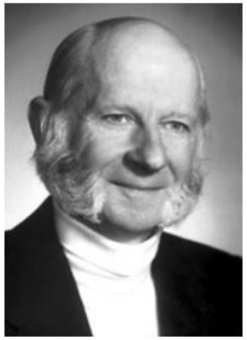
超导量子比特

……

Nature **volume464**, pages45–53 (04 March 2010)
Nature Photonics **volume11**, pages361–365 (2017)

历史沿革

- 带电粒子的电磁束缚（1960's） - 质量谱仪，真空泵
- 单电子束缚（1973）
- 单电子g因子精密测量（1977）
- 激光冷却Mg离子低于室温（1978）
- 单个Ba离子束缚（1980）



Hans G. Dehmelt

Wolfgang Paul

1989 Nobel Prize

PRL. 31, 1279, 1973; PRL 38, 310, 1977; PRL 40, 1639, 1978; PRA 22, 1137, 1980

- 单独离子实验演示基本量子物理，发明离子性原子钟（1980’s）
- 离子的激光两比特量子门（1995）
- Hg离子光钟精度超过Cs原子钟（2006）;Al离子钟演示10cm高度差的引力变化（2010）
- 两比特门精度>90%(2003);>99%(2008),>99.9%(2016)

PRL 75, 4714, 1995; NATURE 422, 412, 2003; PRL 97, 020801, 2006; Nat.Phys 4, 463, 2008; PRL 117, 060505 (2016); PRL 117, 060504 (2016); Science 329, 1630, 2010 "for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

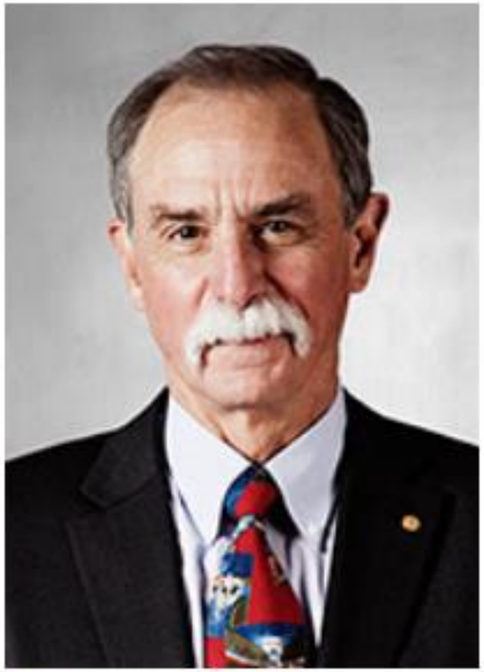
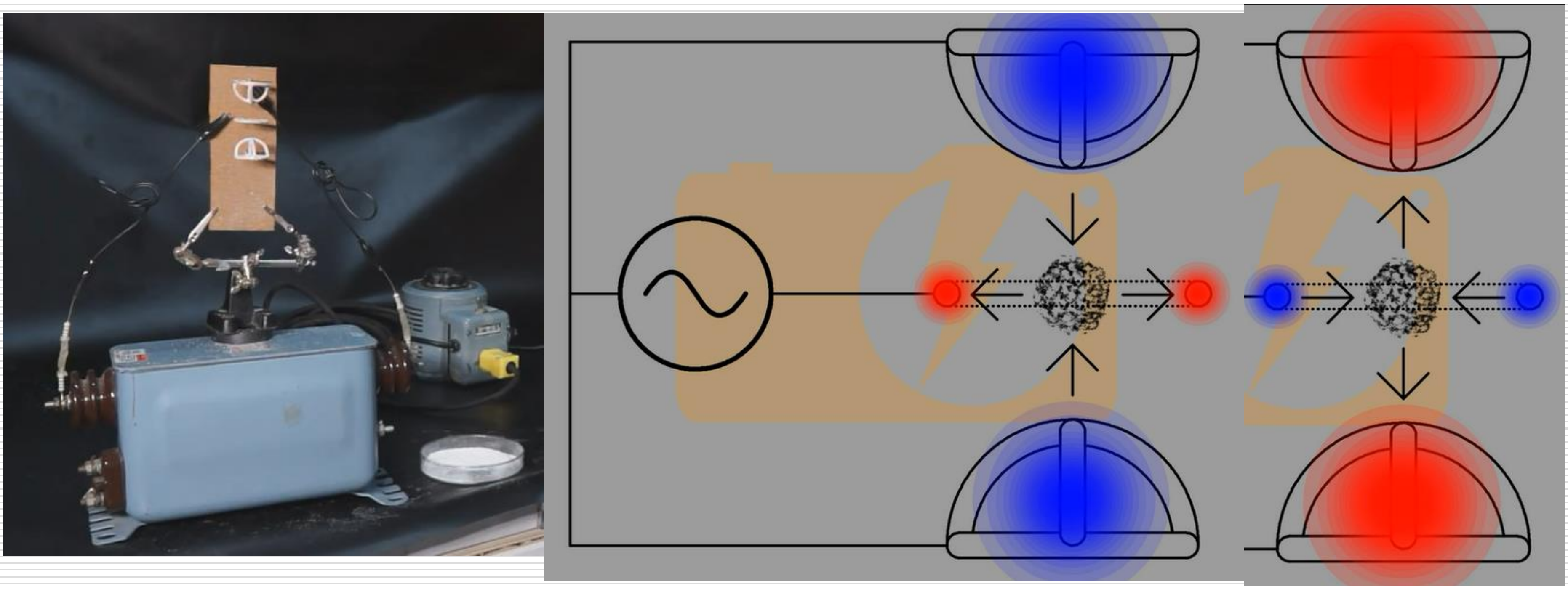


Photo: U. Montan

David J. Wineland

单离子的测量和操控（2012）

车库实验：束缚带电的颗粒



Credit: youtube.com/watch?v=u_OIVz95_tw

Credit: youtube.com/watch?v=u_OlVz95_tw

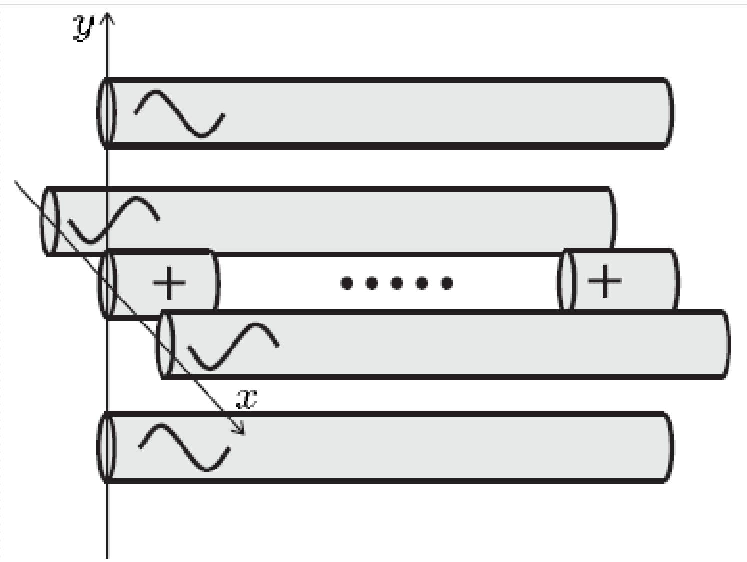
真空腔
透镜-收集离子荧光
电极
Pagano, G. et al. Quantum Sci. Technol. 4, 014004 (2019).
y
z
x
≃ 500 μm
激光
电离的原子-离子
~5 μm
Credit： Monroe group

原理

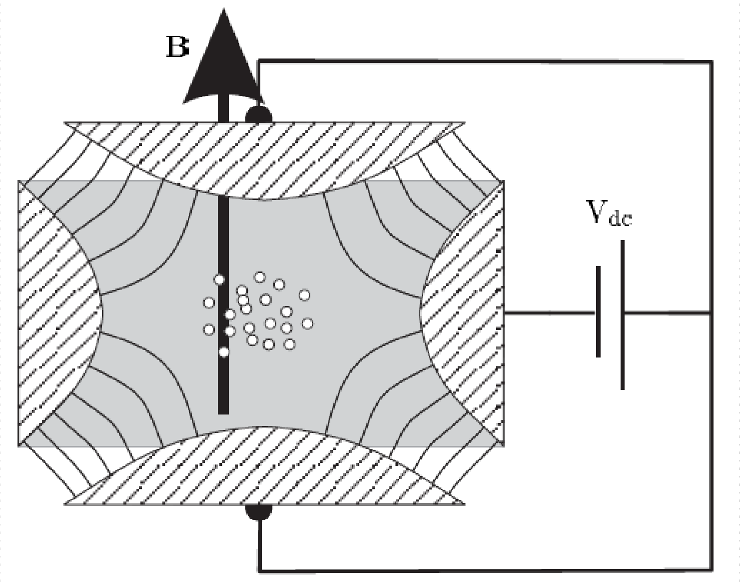
Earnshaw's theorem: a point charge acted on by electrostatic forces cannot rest in a stable equilibrium in an electric field.

交变电场

加静磁场



Linear Paul Trap



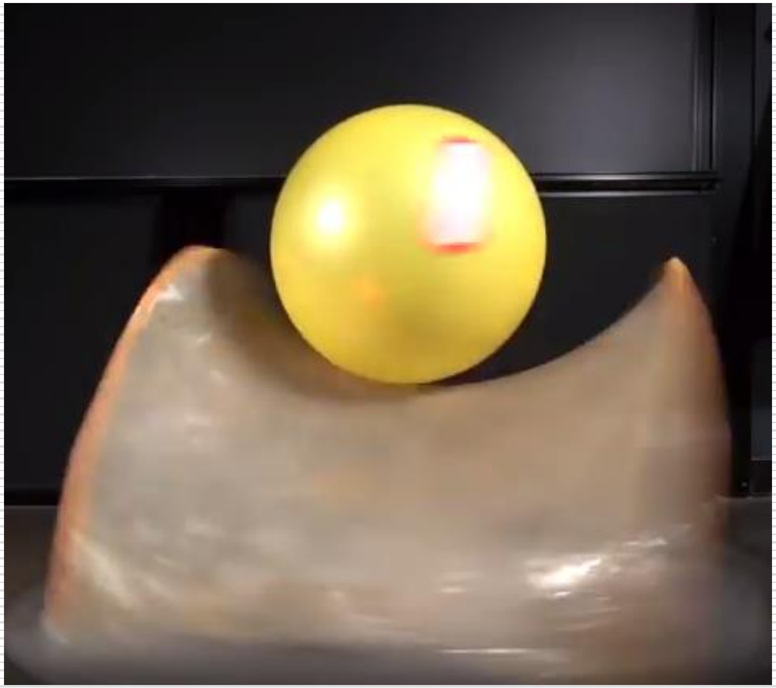
Penning Trap

束缚-运动平衡

通过微运动可以将不稳定平衡点转化成稳定平衡点

——Mathieu方程

倒立单摆

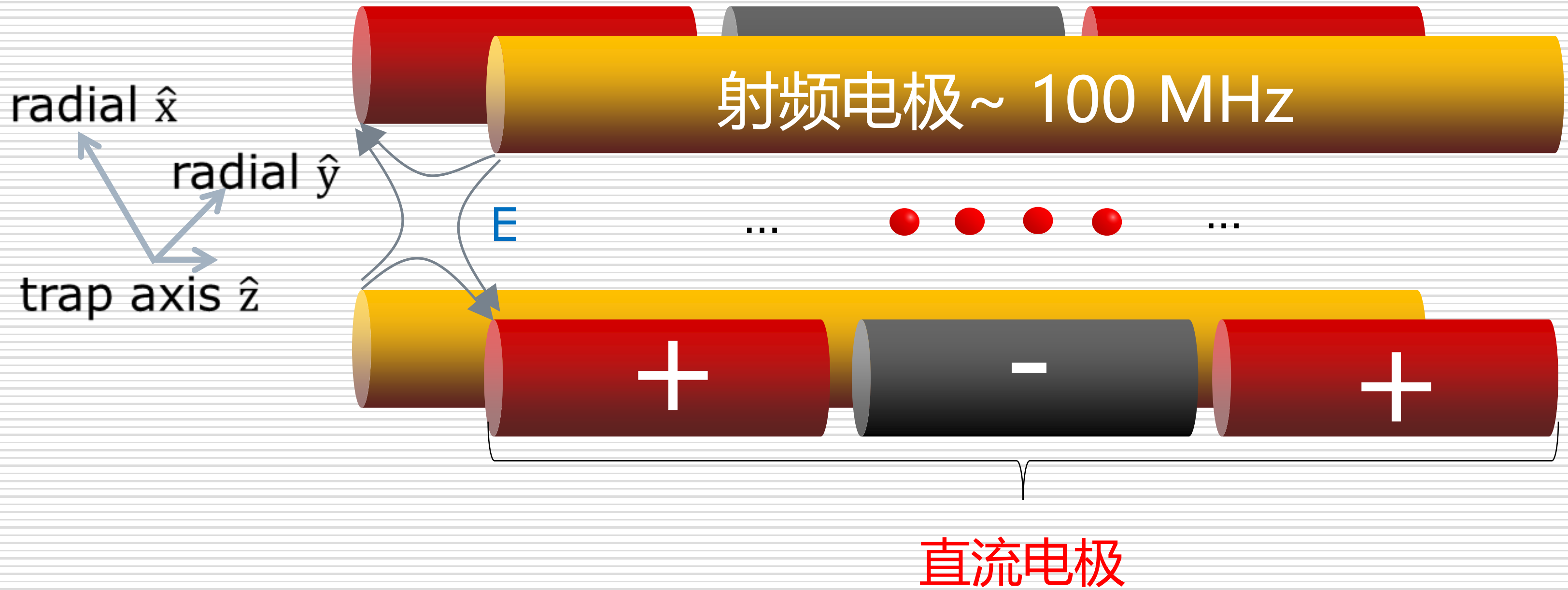


旋转马鞍

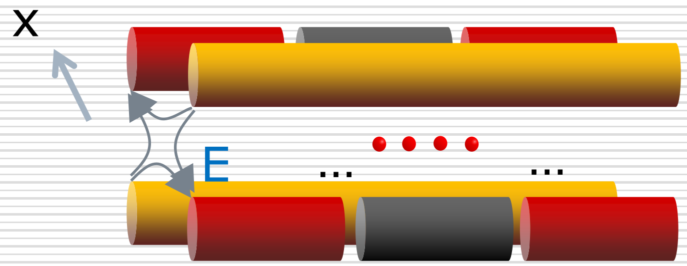
https://www.youtube.com/watch?v=5oGYCxkgnHQ

https://www.youtube.com/watch?v=XTJznUkAmIY

束缚—振动模式



雪茄形状的三维势阱，
离子最低能量状态为一维链*



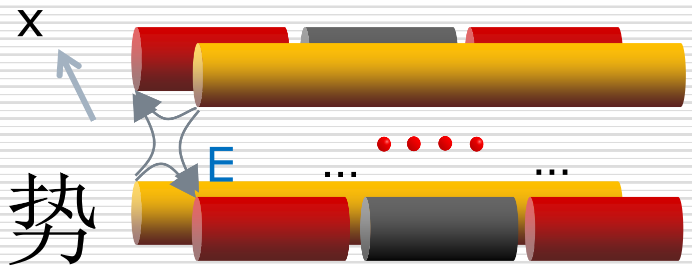
轴向束缚

轴向静电势$qU(z)$

$$qU(z) = \frac{1}{2}\mathrm{m}\omega_z z^2,$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{q}{m}\frac{d^2U(z)}{dz^2}}$$

径向束缚的简化情况-赝势



假设均匀的震荡电场$E = E_0 cos\Omega t$，

带电粒子的运动速度$v = \frac{q}{m\Omega} E_0 \sin\Omega t$，$(m\dot{v} = qE)$

动能$KE = \frac{q^2}{2m\Omega^2} E_0^2 \sin^2 \Omega t$，　$(KE = \frac{1}{2} m v^2)$

于是$KE = \frac{q^2}{4m\Omega^2} E_0^2 (1 - cos2\Omega t)$

假设E_0有微小的空间变化，在震荡的一周期内平均得到

$$KE(x) = \frac{q^2}{4m\Omega^2} E_0^2(x)$$

$\frac{1}{2} m\omega_x^2 x^2 = KE(x)$

$$\omega_x = \frac{q}{m\Omega} \sqrt{\frac{d^2 E_0^2(x)}{dx^2}}$$

一般的情况-微运动

运动方程整理为Mathieu形式

$$\frac{d^2x}{d\zeta^2} + \left[a_x + 2q_x\cos(2\zeta)\right]x = 0$$

其中$\zeta = \Omega t/2$,一般 $a_x < q_x^2 \ll 1$，（弹簧系数$q\frac{dE}{dx} \ll m\Omega^2$）。近似解可以表示为

$$u_i(t) = A_i\left(\cos(\omega_i t + \phi_i)\left[1 + \frac{q_i}{2}\cos(\Omega_T t)\right.\right.$$

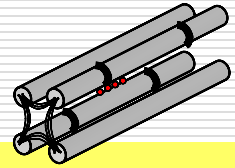
$$\left.\left. + \frac{q_i^2}{32}\cos(2\Omega_T t)\right] + \beta \ldots \sin(\omega_i t + \phi_i)\sin \ldots t)\right)$$

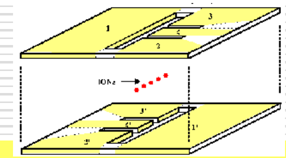
久期
振动频率

振动受外加
交流频率的
调制-微运动

J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **103**, 259 (1998)

Ion Traps - initial micromachining:





典型值:

DC: $U_0 \approx 10\ V$

RF: $V_0 \approx 200\ V$

$\Omega \approx 80\ MHz$

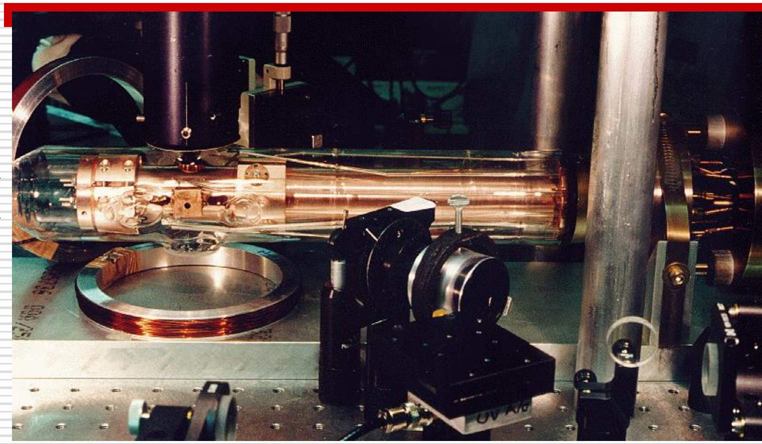
$\omega_x \approx 12\ MHz$

pressure $< 2 \times 10^{-11}$ *torr*

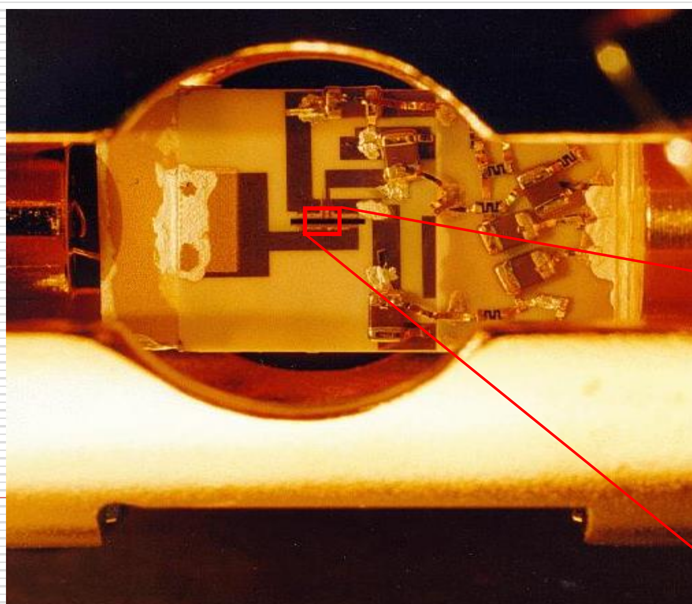
single ion lifetime: ~ *h*

At room temperature

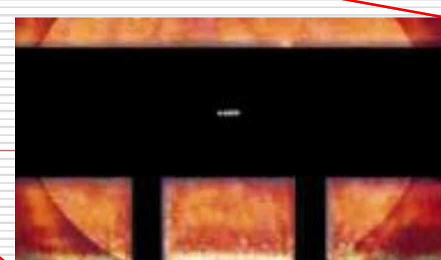
2″



1 cm



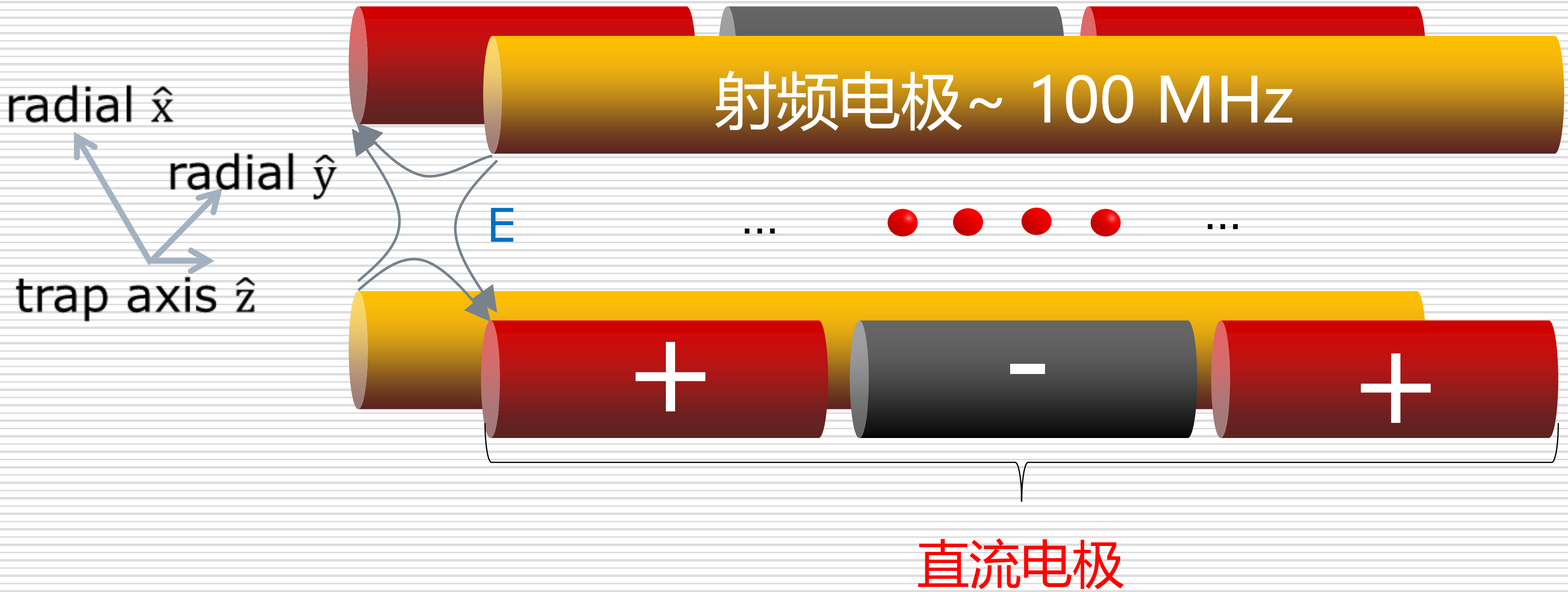
0.2 mm



内容

- 背景介绍
- 自组织的离子链
- 光与离子的相互作用
- 量子计算和量子模拟

束缚-求解振动模式



雪茄形状的三维势阱，
离子最低能量状态为一维链*

束缚–求解振动模式

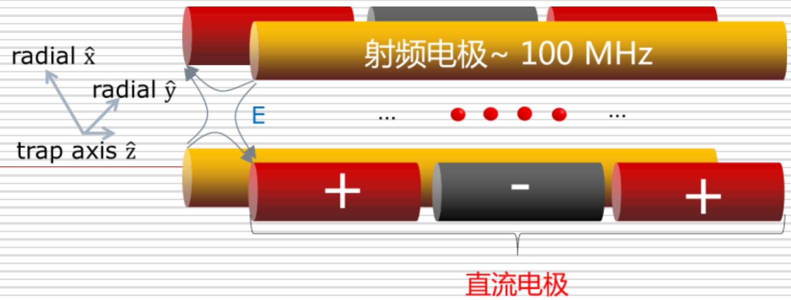
单离子束缚

$$V=\sum_i \frac{1}{2} m\omega_z^2 z_i^2+\sum_i \frac{1}{2} m\omega_x^2 x_i^2+\sum_i \frac{1}{2} m\omega_y^2 y_i^2$$

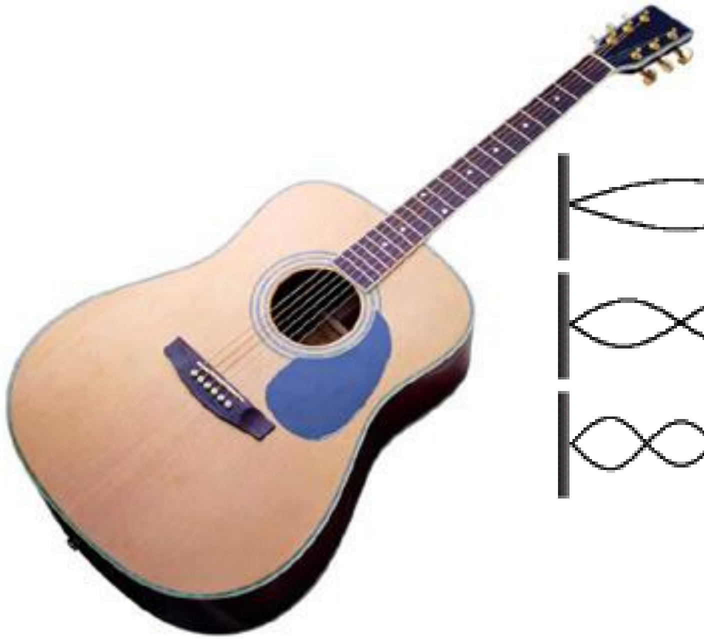
$$+\sum_{i>j} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+(z_i-z_j)^2}}$$

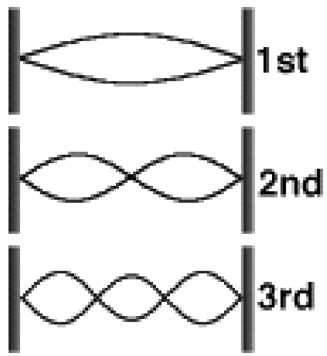
离子间相互作用

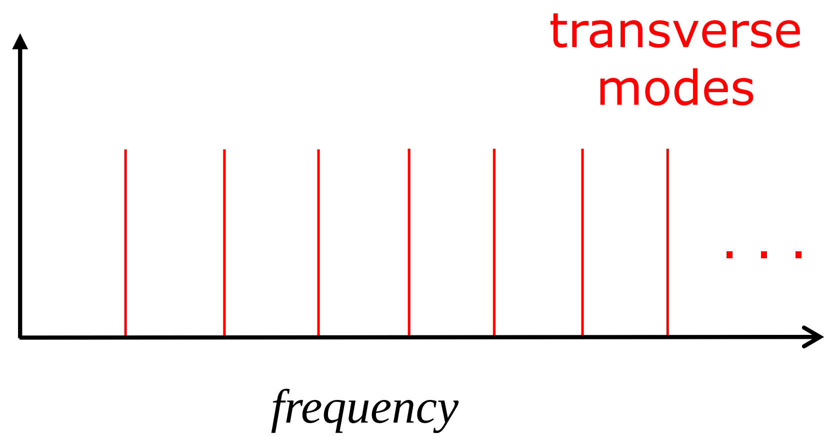
思路：首先求解平衡位置，
再展开求简正模式

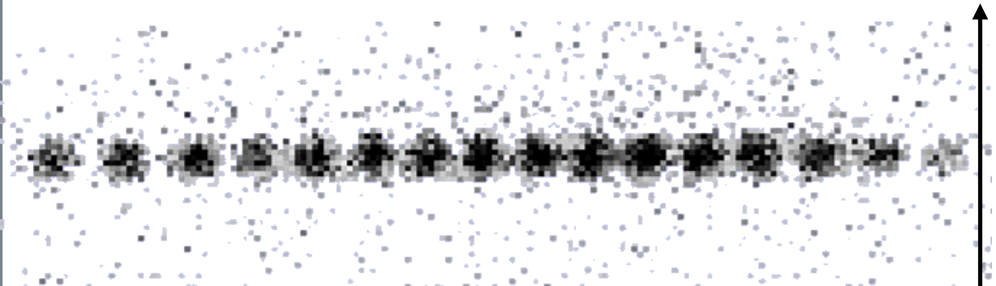


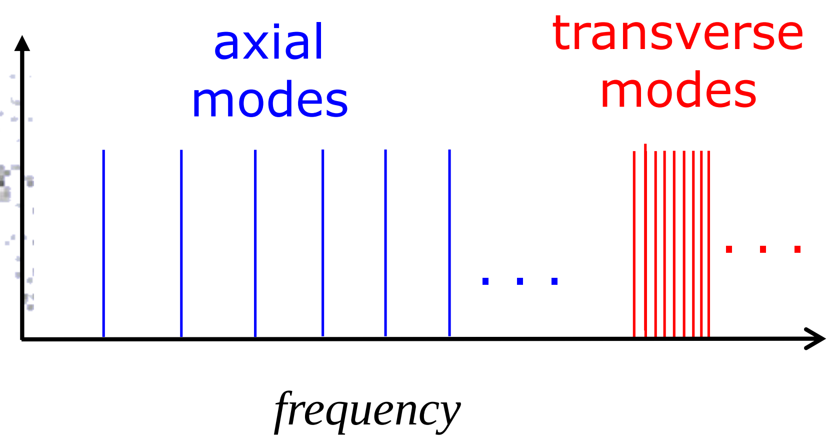
Aside: transverse Modes of an atom chain







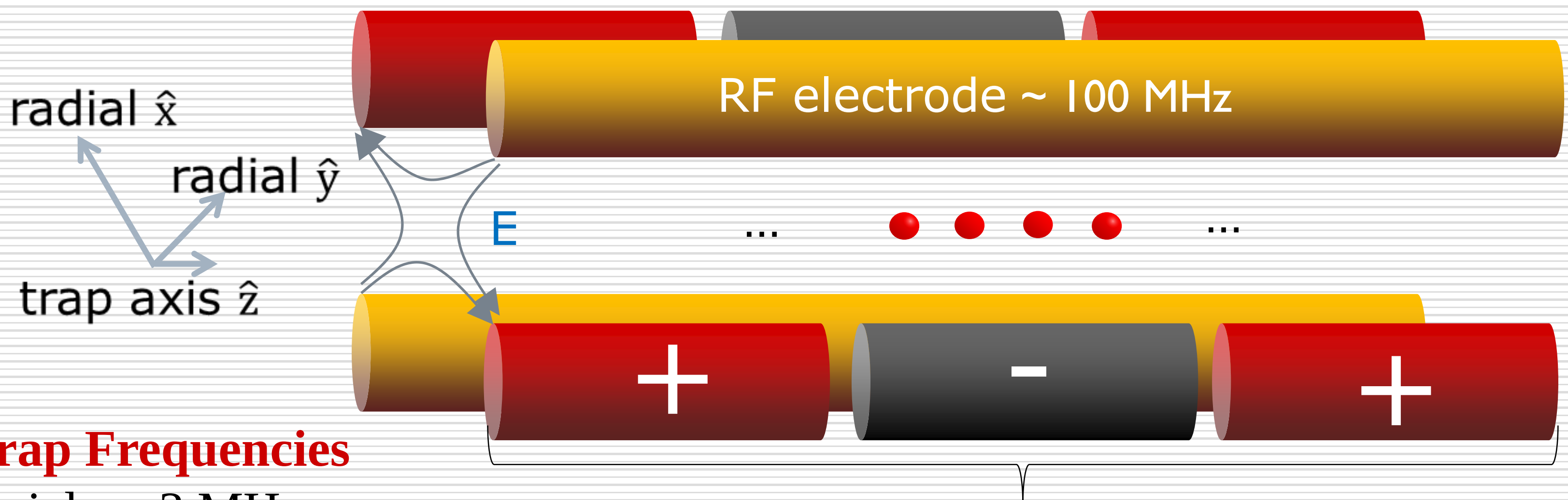




S.-L. Zhu et al., Phys. Rev. Lett. 97, 050505 (2006)
A. Serafini et al., New J. Phys. 11, 023007 (2009)

Credit: C. Monroe

束缚-振动模式



Trap Frequencies

Axial : ~ 3 MHz

Radial: ~ 10 MHz

N ions in a chain: N axial modes: Shared motion

Quantized motion