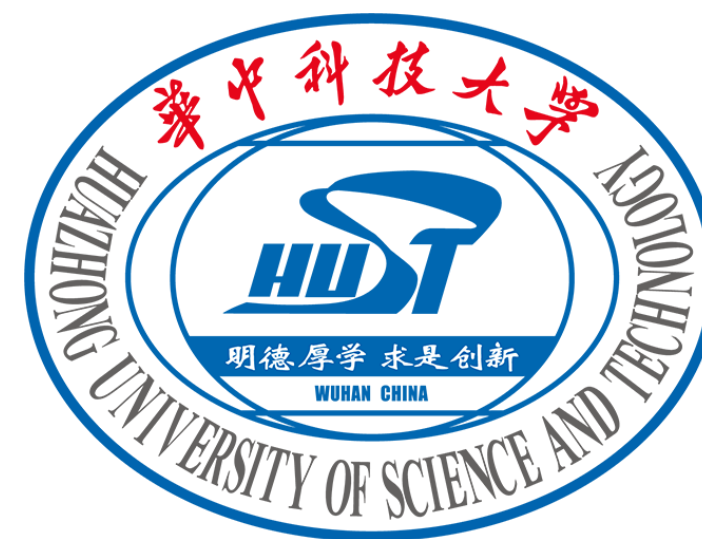


# 基于自旋量子传感的纳米尺度离子探测方法

答辩人：黄 晨

指导老师：蔡建明 教授



2022 年 5 月 25 日

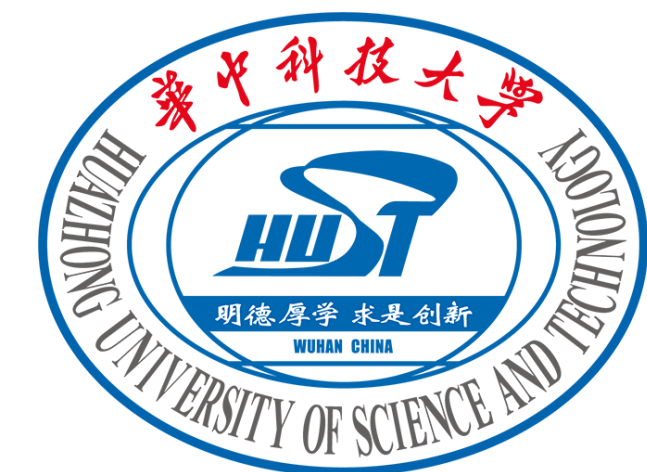
## ① 金刚石NV色心的退相干传感

- ▶ 量子传感与量子传感器
- ▶ 金刚石NV色心的退相干传感
- ▶ 利用量子退相干测量溶液中的自旋

## ② 交流电压下溶液离子分布计算

- ▶ 表面力仪(SFA)与PNP方程
- ▶ 表面力仪的一维模型
- ▶ 一维模型的解析解

## ③ 总结与展望



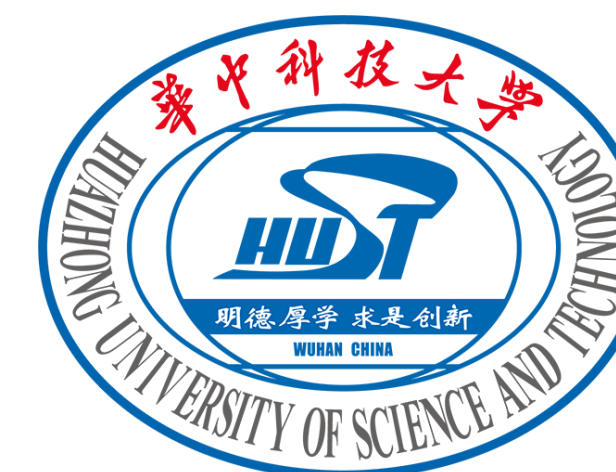
# 1 金刚石NV色心的退相干传感

- ▶ 量子传感与量子传感器
- ▶ 金刚石NV色心的退相干传感
- ▶ 利用量子退相干测量溶液中的自旋

# 2 交流电压下溶液离子分布计算

- ▶ 表面力仪(SFA)与PNP方程
- ▶ 表面力仪的一维模型
- ▶ 一维模型的解析解

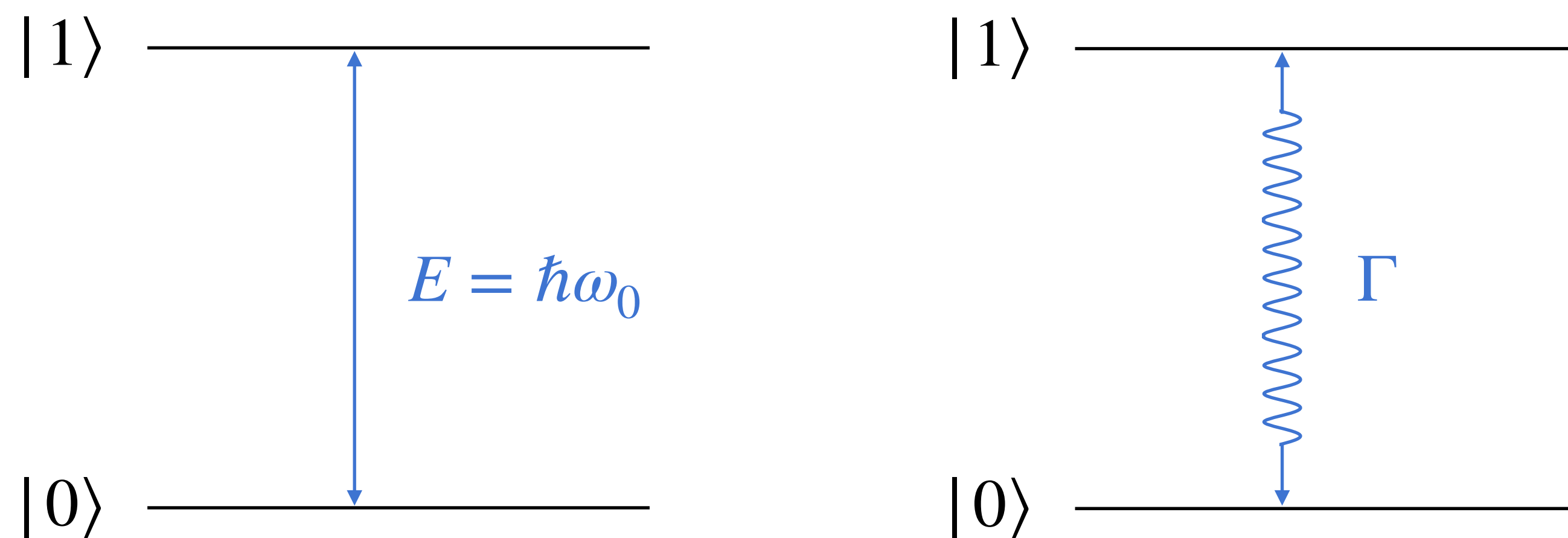
# 3 总结与展望



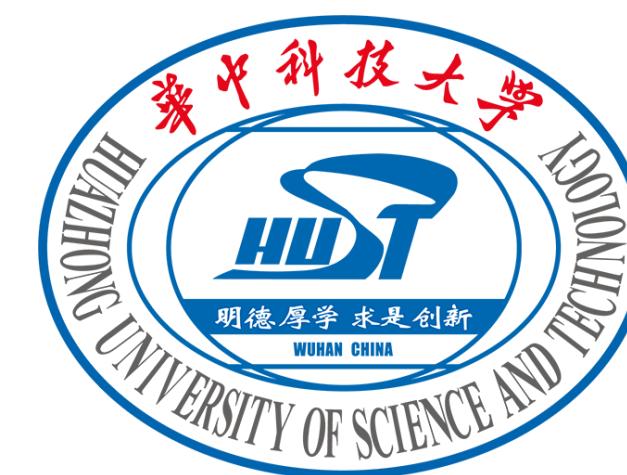
# 量子传感与量子传感器

“量子传感”指利用量子系统、量子特性或量子现象对物理量进行测量

- (I) 利用具有量子化能级的系统测量经典或量子物理量；
- (II) 利用量子相干性测量物理量；
- (III) 利用量子纠缠提升测量的灵敏度或精度。



图：一个最基础的二能级量子系统。 $|0\rangle$ 为系统中的较低能态， $|1\rangle$ 为较高能态。量子传感通过跃迁频率 $\omega_0$ 或跃迁速率 $\Gamma$ 的变化来感知外部信号 $V$ 。





# 量子传感与量子传感器

	执行	量子比特	测量量	初始化	读出	类型
中性原子	原子蒸气	原子自旋	磁场、旋转、 时间/频率	光场	光场	II-III
	冷云	原子自旋	磁场、加速度、 时间/频率	光场	光场	II-III
离子阱		长寿命电子态	时间/频率 旋转	光场	光场	II-III II
		振动模式	电场、力	光场	光场	II
里德堡原子		里德堡态	电场	光场	光场	II-III
固态自旋 (系综)	NMR 传感器	核自旋	磁场	热场	拾波线圈	II
	NV 色心系综	电子自旋	磁场、电场、 温度、压力、旋转	光场	光场	II
固态自旋 (单个自旋)	Si 中的 P 供体	电子自旋	磁场	热场	电场	II
	半导体量子点	电子自旋	磁场、电场	电场、光场	电场、光场	I-II
	单个 NV 色心	电子自旋	磁场、电场、 温度、压强、旋转	光场	光场	II
超导电路	SQUID	超导电流	磁场	热场	电场	I-II
	磁通量子比特	环形电流	磁场	热场	电场	II
	电荷量子比特	电荷本征态	电场	热场	电场	II



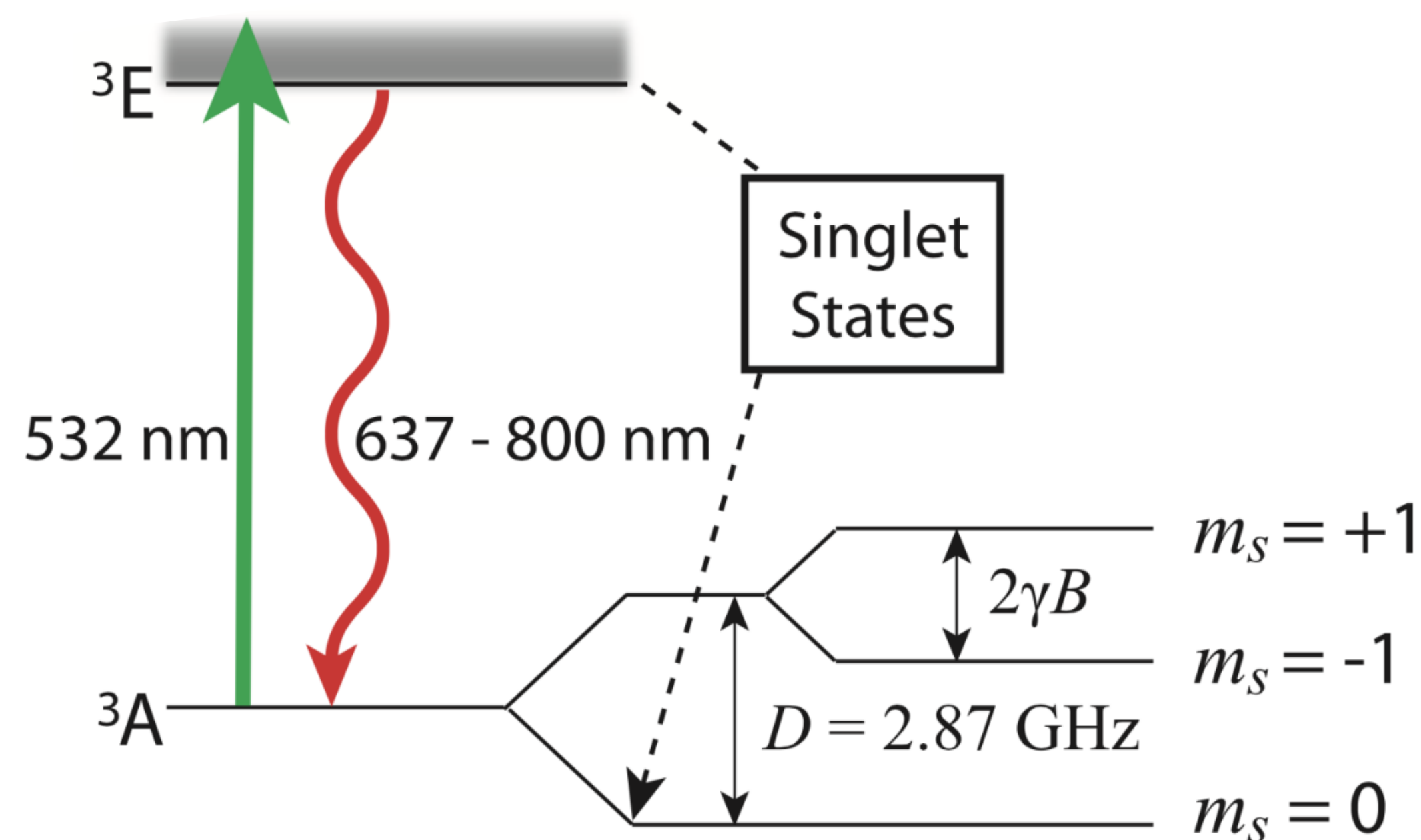
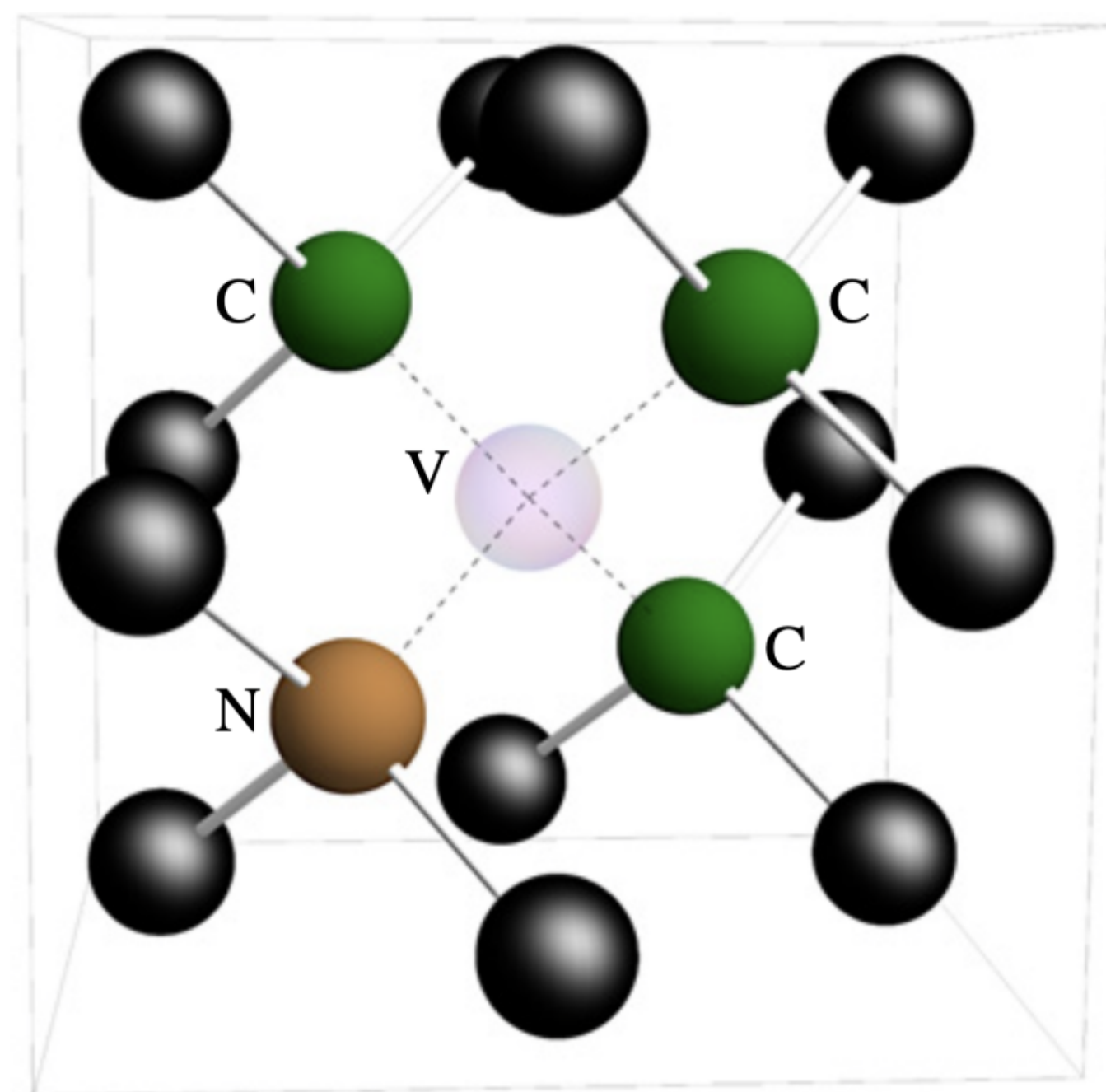
# 量子传感与量子传感器

	执行	量子比特	测量量	初始化	读出	类型
中性原子	原子蒸气	原子自旋	磁场、旋转、 时间/频率	光场	光场	II-III
	冷云	原子自旋	磁场、加速度、 时间/频率	光场	光场	II-III
离子阱		长寿命电子态	时间/频率 旋转	光场	光场	II-III II
		振动模式	电场、力	光场	光场	II
里德堡原子		里德堡态	电场	光场	光场	II-III
固态自旋 (系综)	NMR 传感器	核自旋	磁场	热场	拾波线圈	II
	NV 色心系综	电子自旋	磁场、电场、 温度、压力、旋转	光场	光场	II
固态自旋 (单个自旋)	Si 中的 P 供体	电子自旋	磁场	热场	电场	II
	半导体量子点	电子自旋	磁场、电场	电场、光场	电场、光场	I-II
	单个 NV 色心	电子自旋	磁场、电场、 温度、压强、旋转	光场	光场	II
超导电路	SQUID	超导电流	磁场	热场	电场	I-II
	磁通量子比特	环形电流	磁场	热场	电场	II
	电荷量子比特	电荷本征态	电场	热场	电场	II





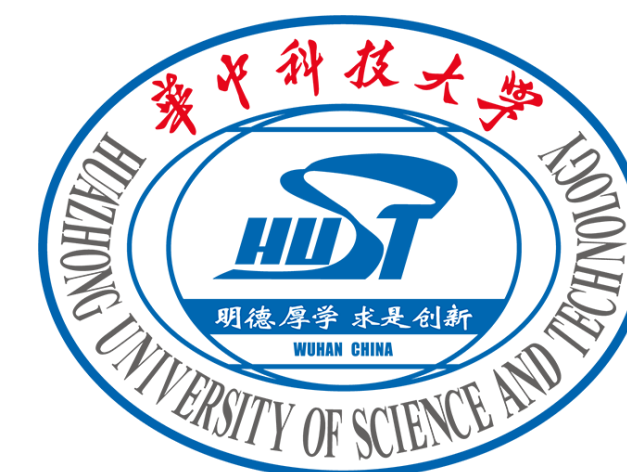
# 金刚石NV色心的结构



图：金刚石NV(Nitrogen-Vacancy，氮空位)色心的结构。

(a) 金刚石NV晶胞结构。

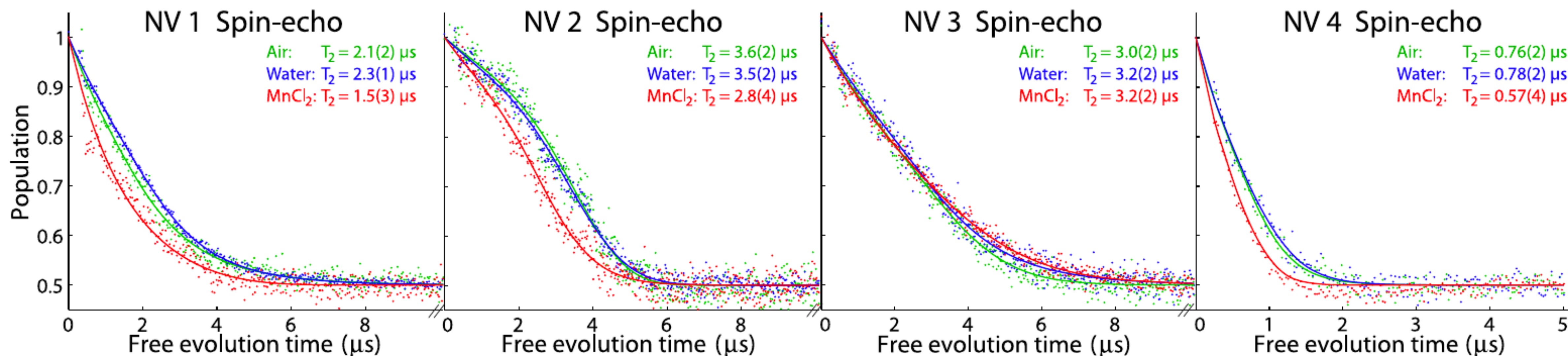
(b) 室温下金刚石NV色心电子能级结构（未显示超精细能级结构）。



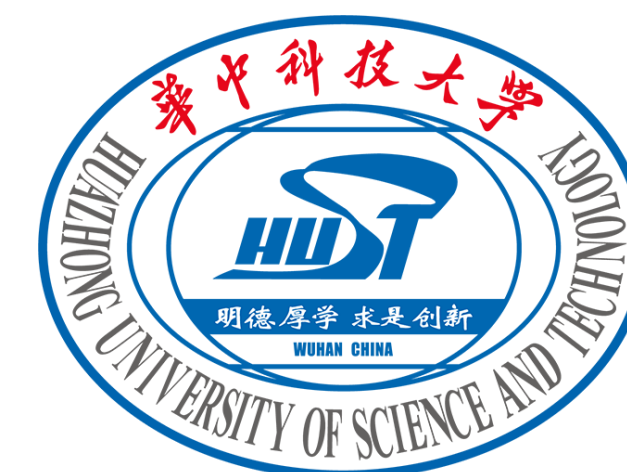
# 金刚石NV色心的退相干传感

核自旋与电子自旋的耦合  $\rightarrow$  电子自旋中的退相干  $\rightarrow T_2^*$  1~10 ns

核自旋之间的直接相互作用  $\rightarrow T_2$  1~10  $\mu$ s



图：NV色心在不同浸润条件下的退相干特性和处于溶液中的 $Mn^{2+}$ 自旋。





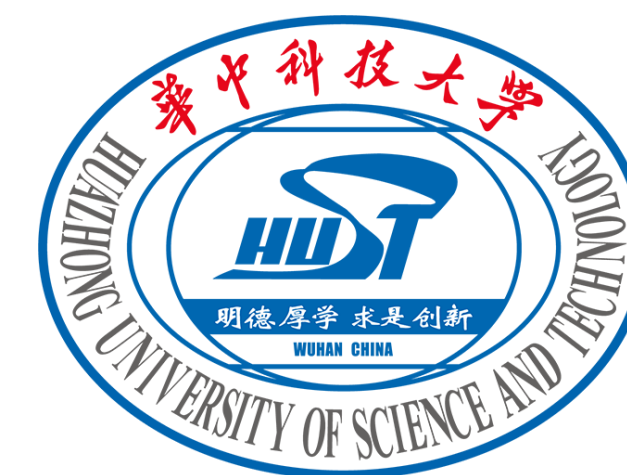
## 1 金刚石NV色心的退相干传感

- ▶ 量子传感与量子传感器
- ▶ 金刚石NV色心的退相干传感
- ▶ 利用量子退相干测量溶液中的自旋

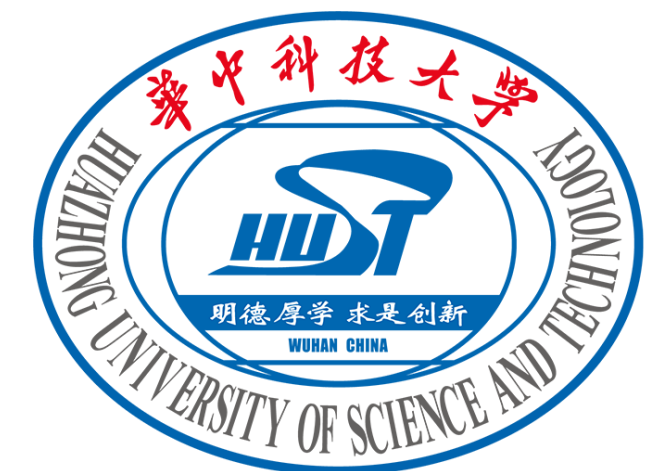
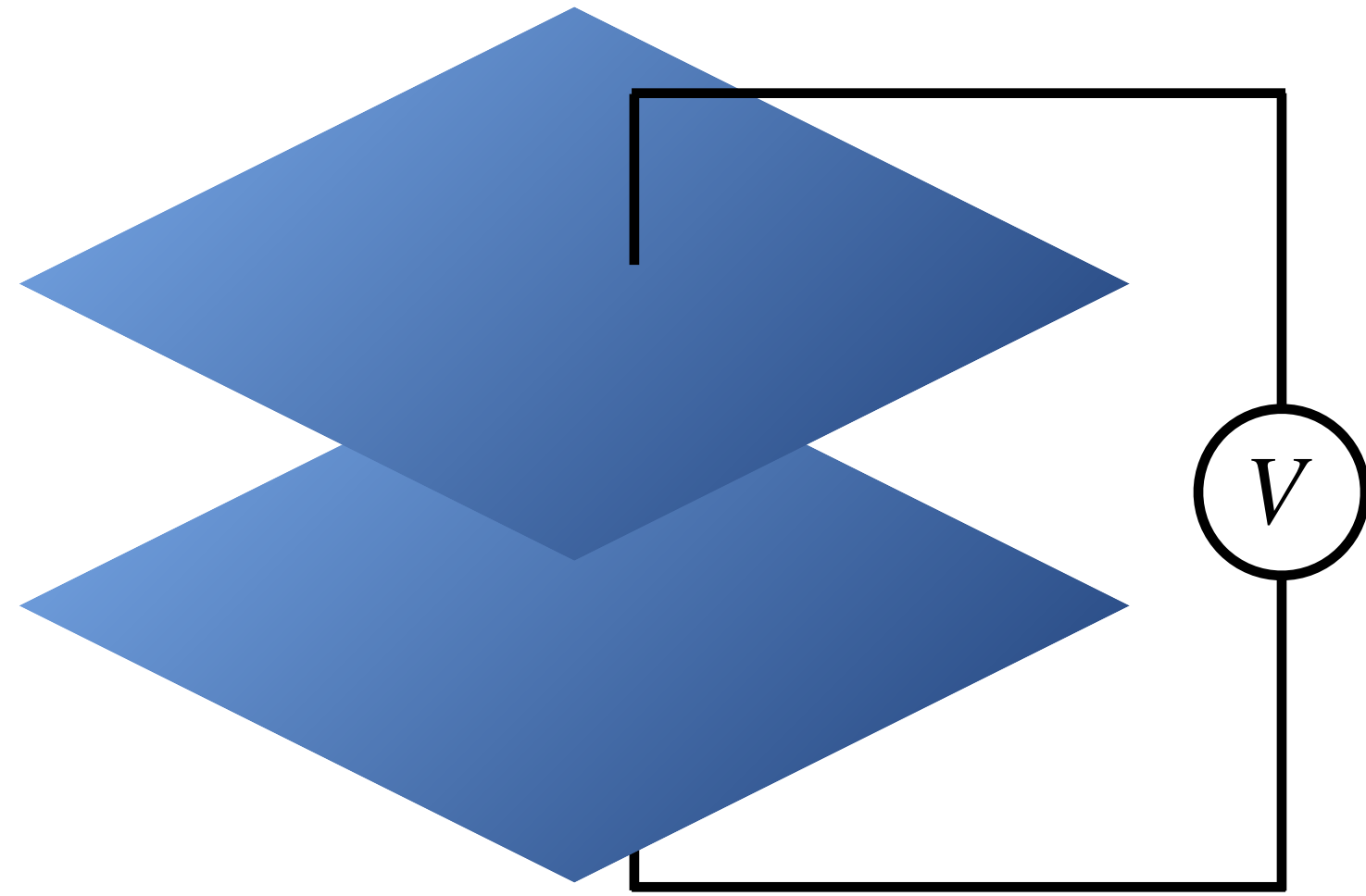
## 2 交流电压下溶液离子分布计算

- ▶ 表面力仪(SFA)与PNP方程
- ▶ 表面力仪的一维模型
- ▶ 一维模型的解析解

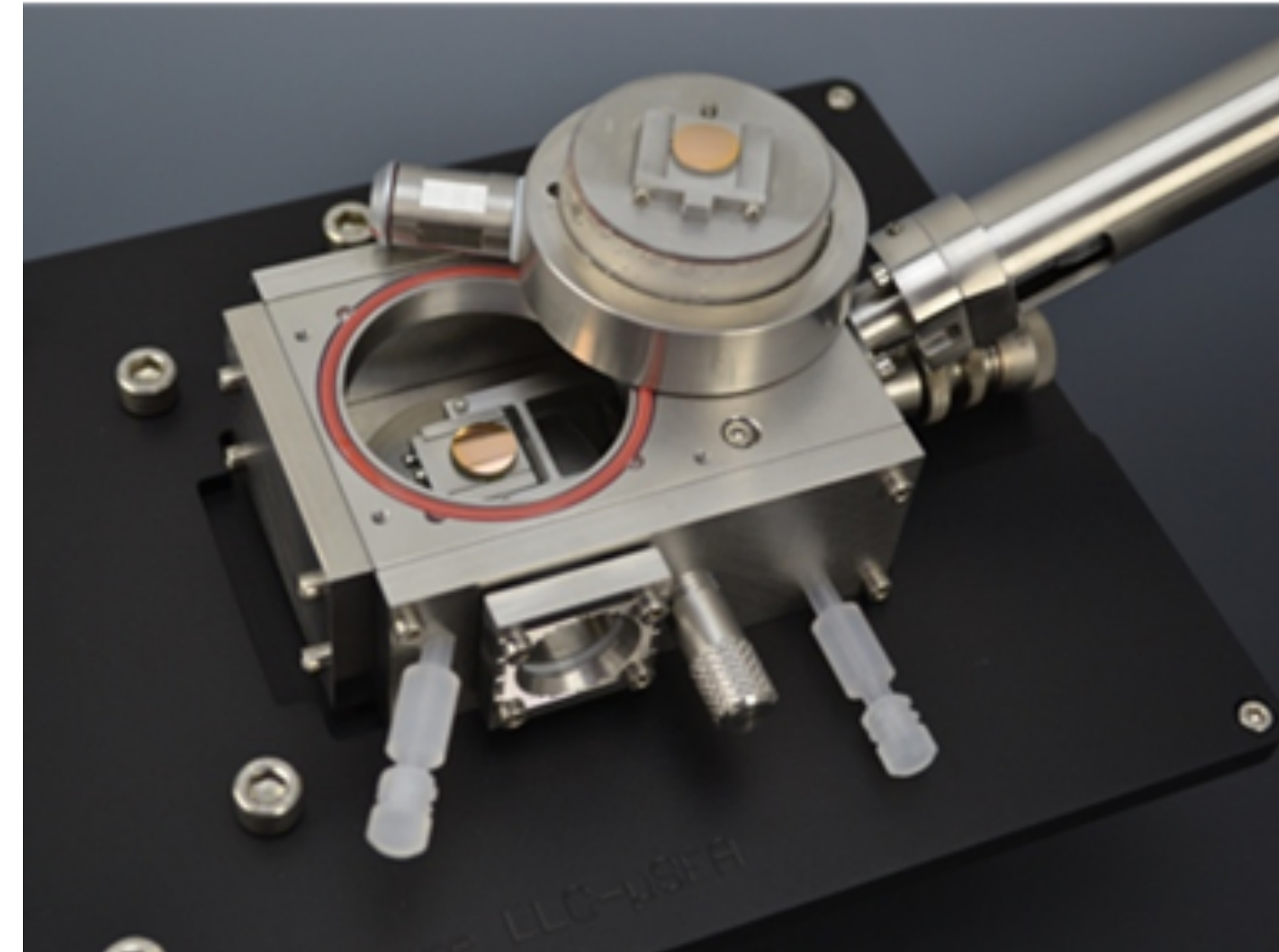
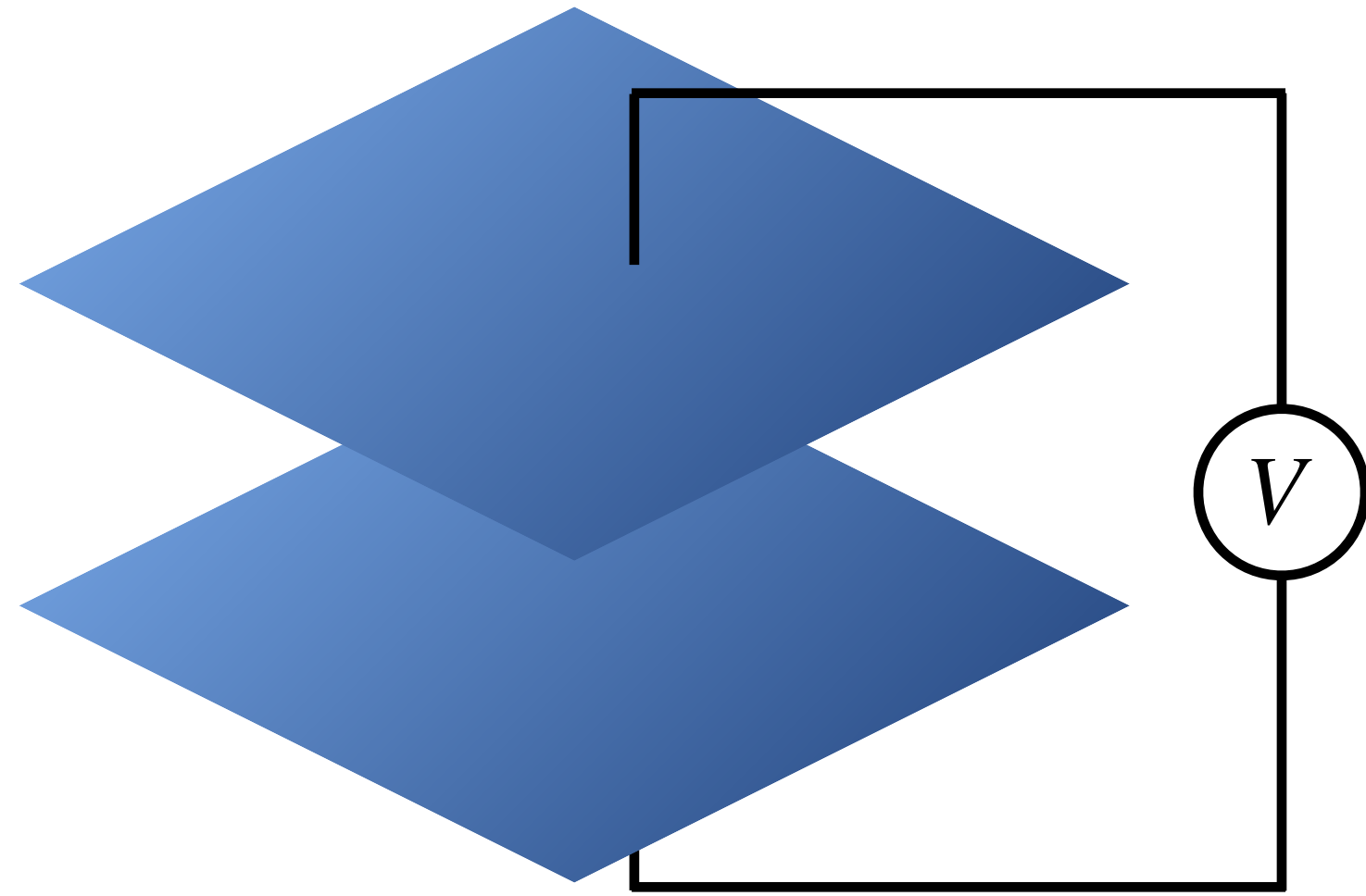
## 3 总结与展望



# 表面力仪 (Surface Forces Apparatus, SFA)



# 表面力仪 (Surface Forces Apparatus, SFA)

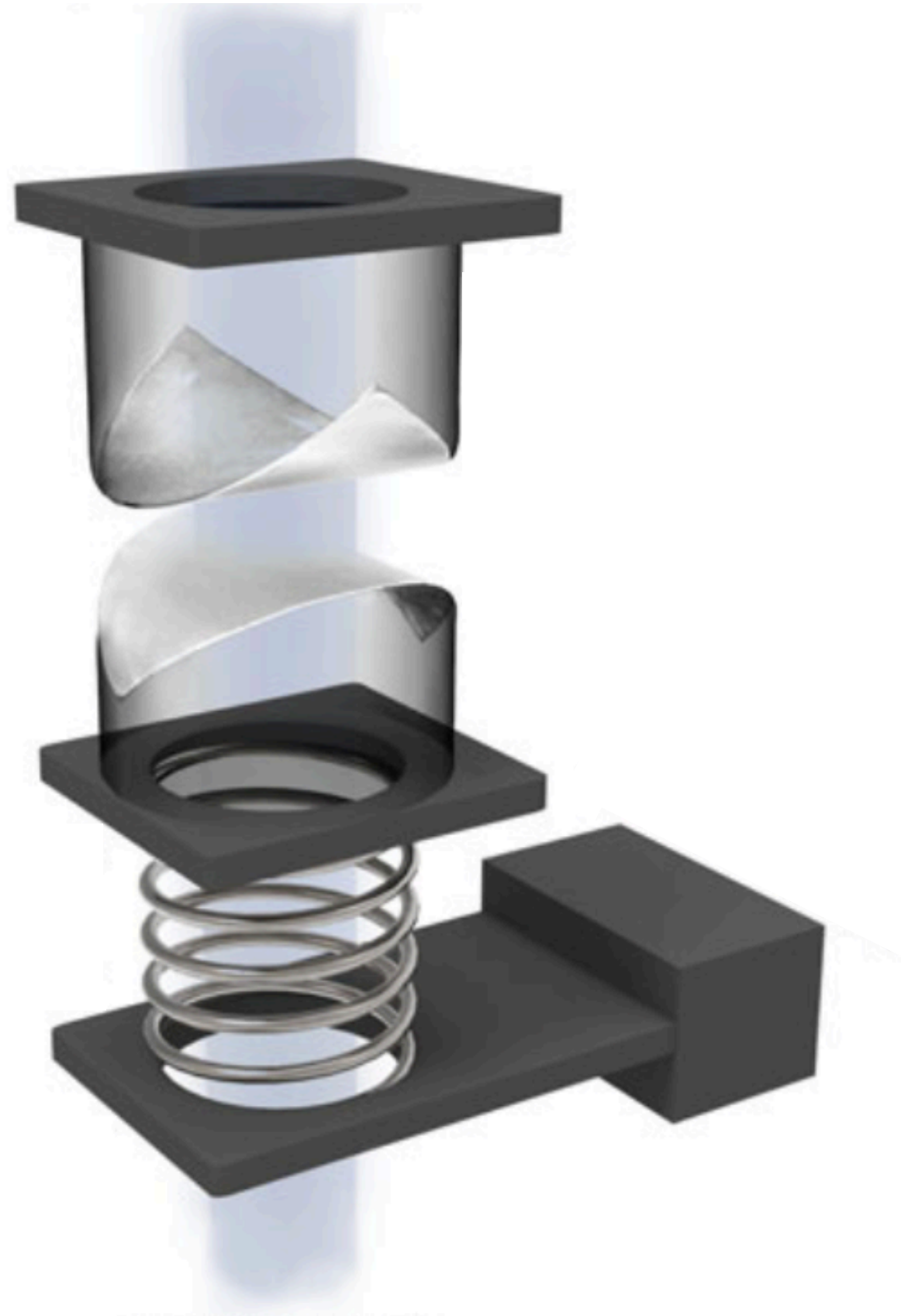


图：表面力仪(SFA)示意图

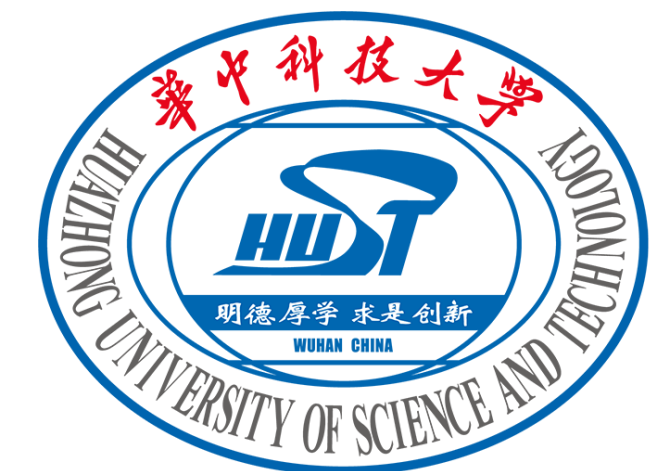




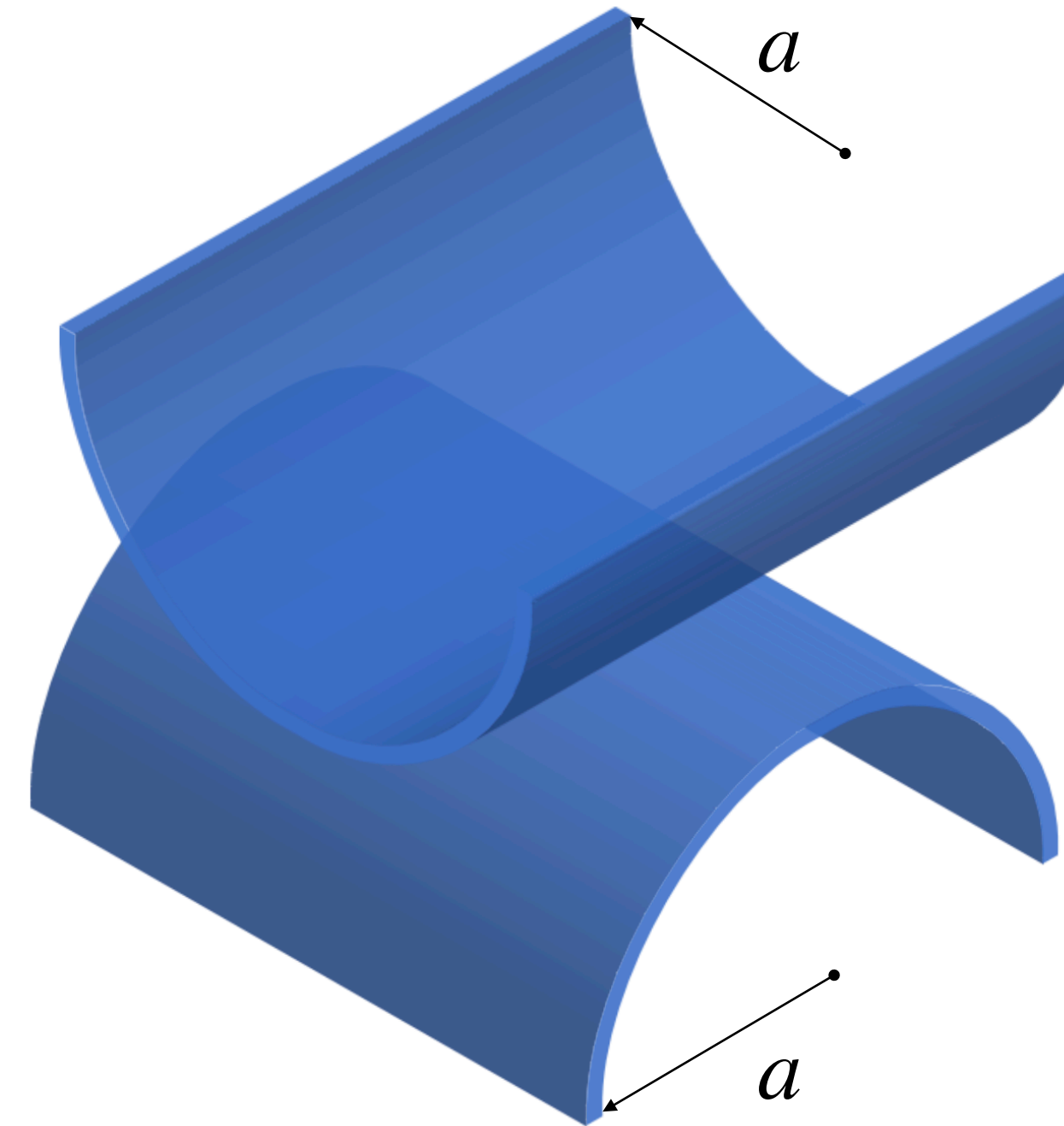
# 表面力仪 (Surface Forces Apparatus, SFA)



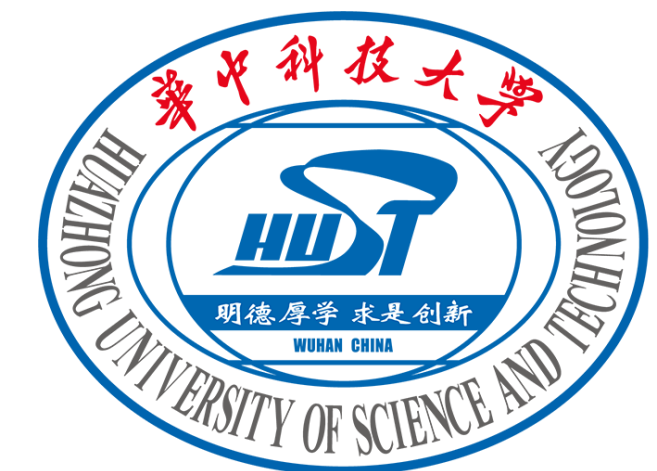
图：表面力仪(SFA)示意图



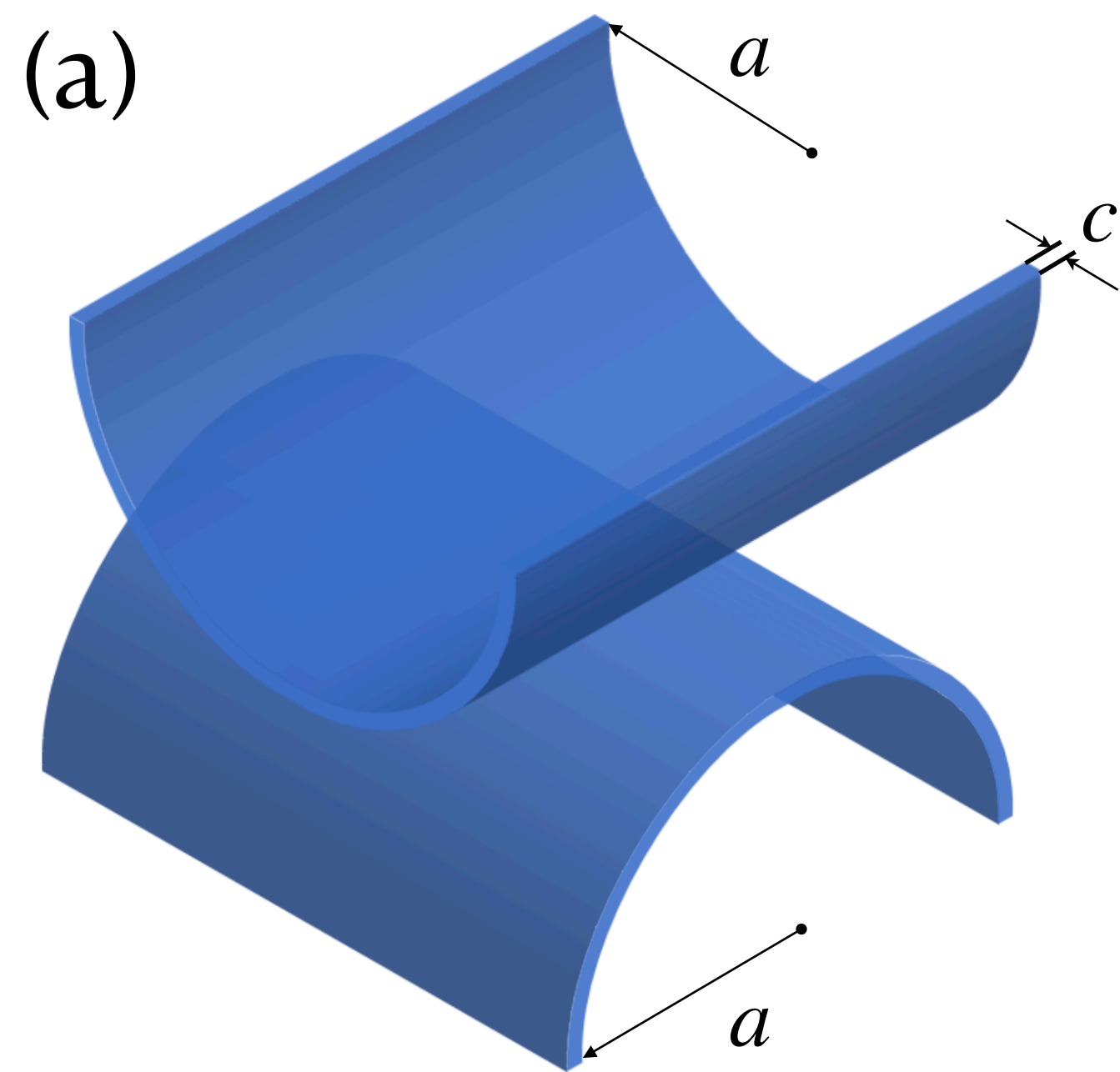
# 表面力仪 (Surface Forces Apparatus, SFA)



图：表面力仪(SFA)示意图



# 表面力仪的一维模型



图：表面力仪腔体模型的几何特征。

(a) 两个半径为  $a$  的交叉圆柱体表面。

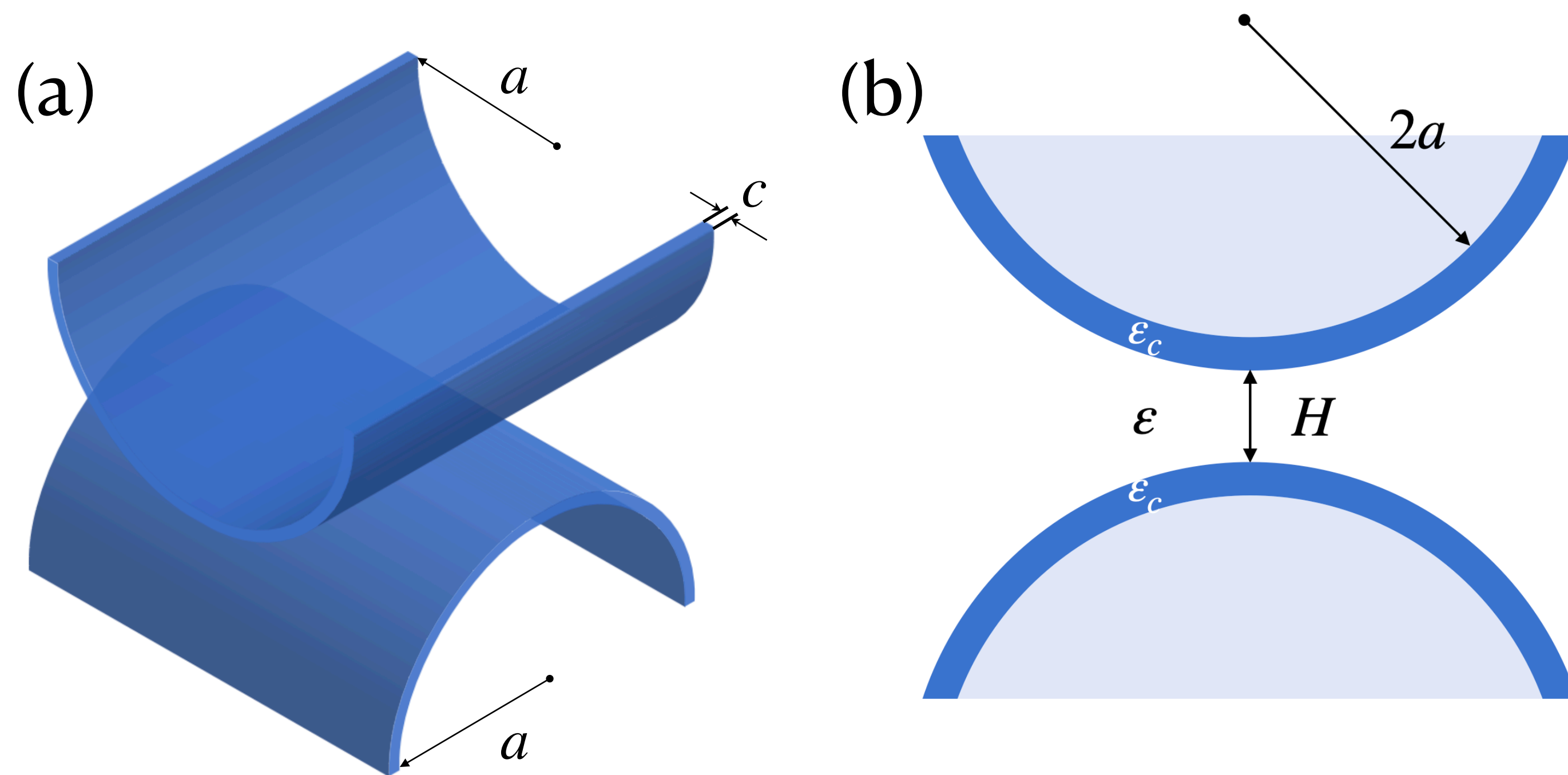
(b) 在  $H + 2c \ll a$  情况下，交叉圆柱可近似为两个半径为  $2a$  的球体。

(c) 在  $\lambda_D \ll H$  情况下，两个半径为  $2a$  的球体可进一步近似为距离为  $2L$  的两平行板。





# 表面力仪的一维模型



图：表面力仪腔体模型的几何特征。

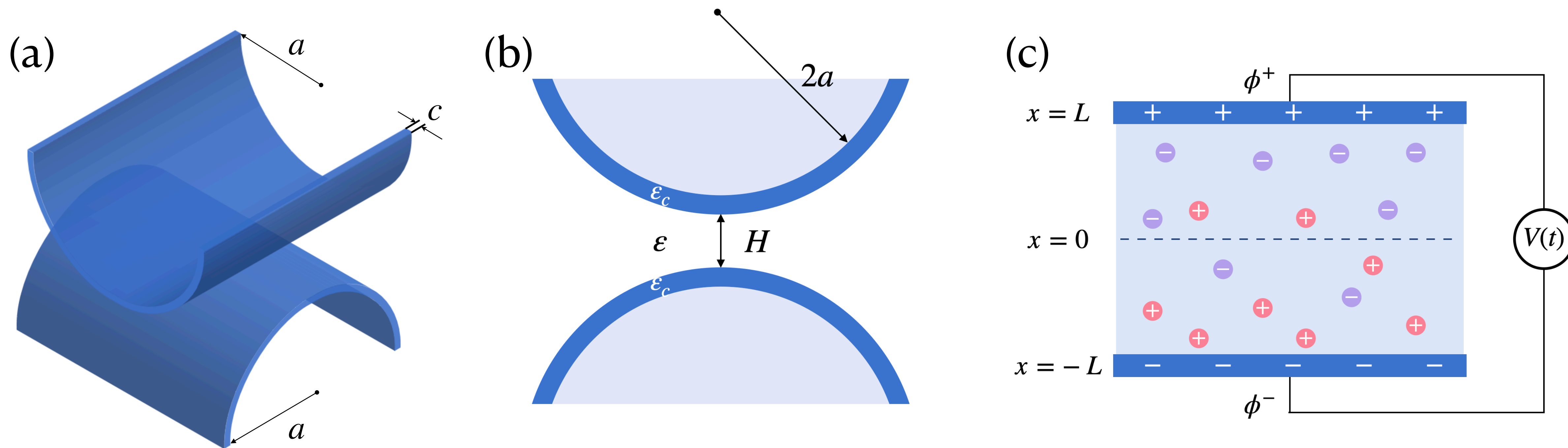
(a) 两个半径为  $a$  的交叉圆柱体表面。

(b) 在  $H + 2c \ll a$  情况下，交叉圆柱可近似为两个半径为  $2a$  的球体。

(c) 在  $\lambda_D \ll H$  情况下，两个半径为  $2a$  的球体可进一步近似为距离为  $2L$  的两平行板。



# 表面力仪的一维模型



图：表面力仪腔体模型的几何特征。

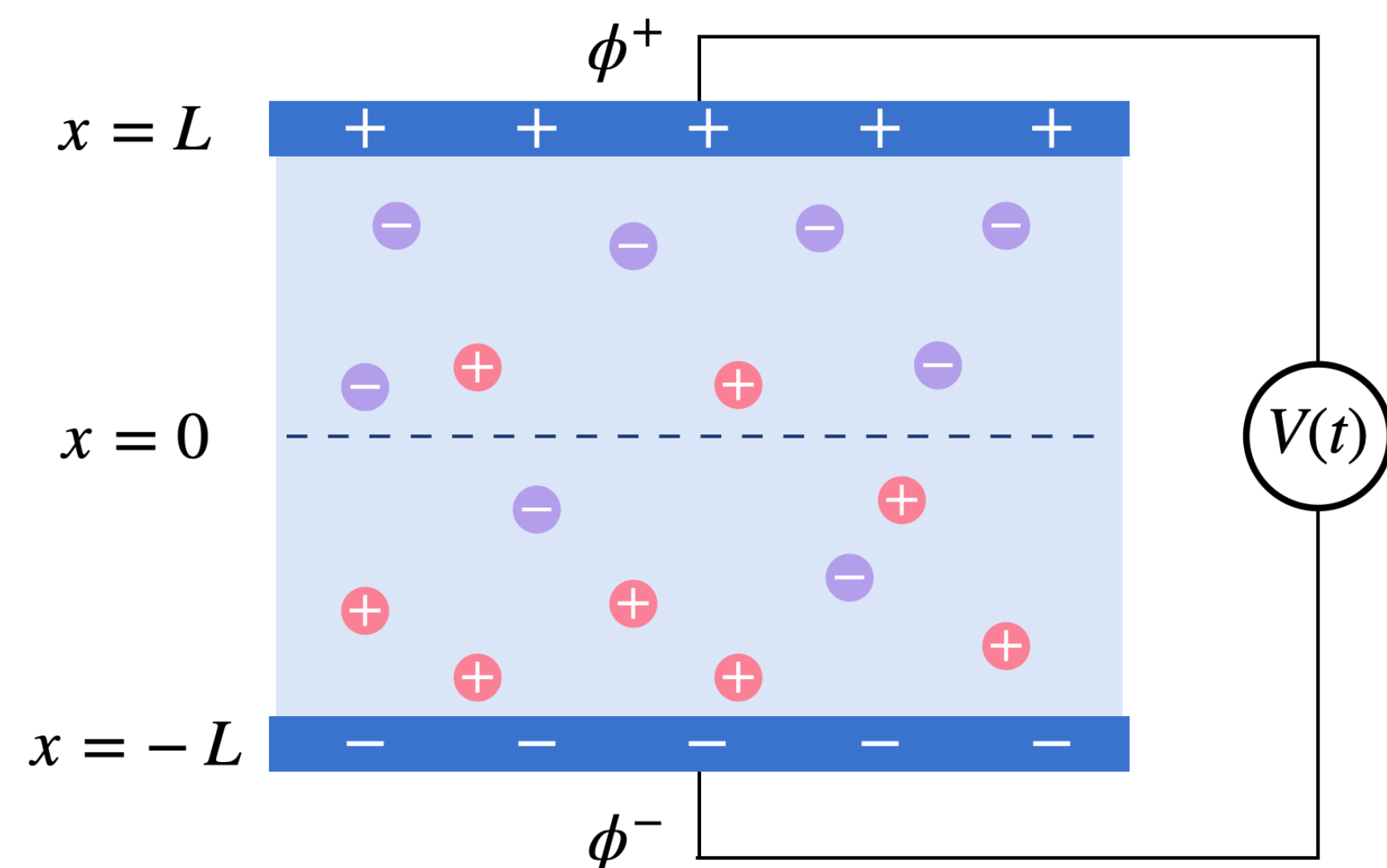
(a) 两个半径为  $a$  的交叉圆柱体表面。

(b) 在  $H + 2c \ll a$  情况下，交叉圆柱可近似为两个半径为  $2a$  的球体。

(c) 在  $\lambda_D \ll H$  情况下，两个半径为  $2a$  的球体可进一步近似为距离为  $2L$  的两平行板。



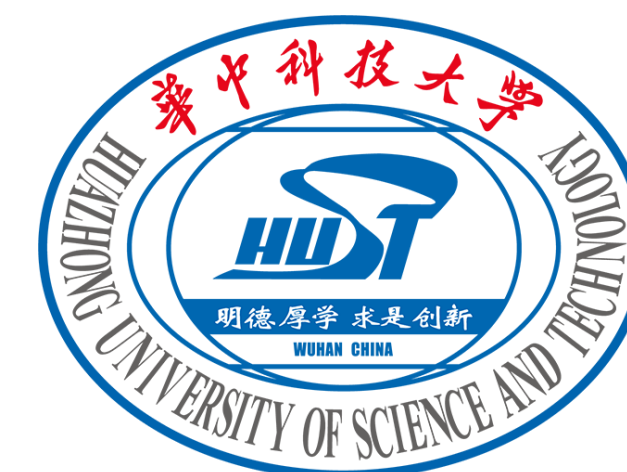
# 一维模型的解析解



## 一维PNP方程

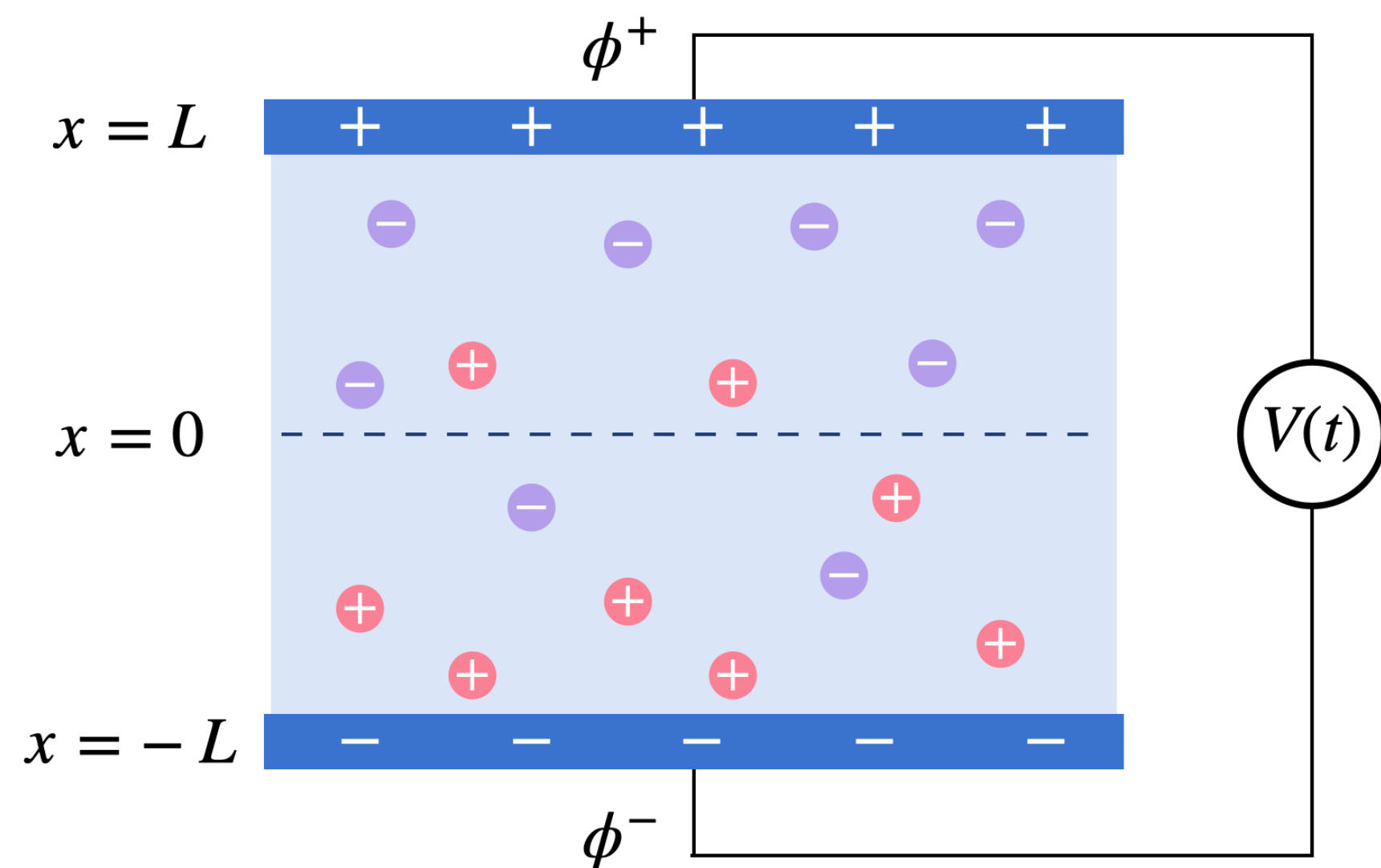
$$\frac{\partial n_{\sigma}}{\partial t} = -\frac{\partial j_{\sigma}}{\partial x} = D \left[ \frac{\partial^2 n_{\sigma}}{\partial x^2} + \sigma \frac{e}{k_B T} \frac{\partial}{\partial x} \left( n_{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]$$

$$\varepsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -e(n_{+} - n_{-})$$





# 一维模型的解析解



## 一维PNP方程

$$\frac{\partial n_{\sigma}}{\partial t} = -\frac{\partial j_{\sigma}}{\partial x} = D \left[ \frac{\partial^2 n_{\sigma}}{\partial x^2} + \sigma \frac{e}{k_B T} \frac{\partial}{\partial x} \left( n_{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]$$

$$\varepsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -e(n_{+} - n_{-})$$

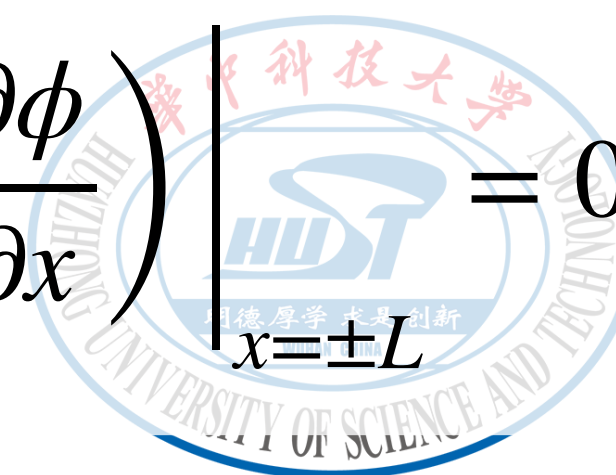
## 边界条件

在平行板处施加交流电压

$$\phi(x = \pm L, t) = \pm V_0 \cos \omega t$$

$$\phi(x = 0, t) = 0$$

$$j_{\sigma}(x = \pm L, t) = -D \left( \frac{\partial n_{\sigma}}{\partial x} + \sigma \frac{e}{k_B T} n_{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \bigg|_{x=\pm L} = 0$$



# 一维模型的解析解 无量纲化

- ▶  $x$  代表位置  $x$  与半腔长度  $L$  的比值, 即  $\frac{x}{L} \rightarrow x$
- ▶  $\phi$  (或  $\mathcal{V}$ ) 代表电势  $\phi$  (或电压  $V$ ) 与电子热电压  $\frac{k_B T}{e}$  的比值, 即  $\frac{\phi(\text{or } V)}{k_B T/e} \rightarrow \phi(\text{or } \mathcal{V})$
- ▶  $n_\sigma$  代表离子浓度  $n_\sigma$  与施加电压前的单粒子离子浓度  $n_0$  的比值, 即  $\frac{n_\sigma}{n_0} \rightarrow n_\sigma$
- ▶  $t$  代表时间  $t$  与Debye层充电的RC时间参数  $\frac{\lambda_D L}{D}$  的比值, 即  $\frac{t}{\lambda_D L/D} \rightarrow t$
- ▶  $\omega$  代表角频率  $\omega$  与RC角频率  $\frac{D}{\lambda_D L}$  的比值, 即  $\frac{\omega}{D/\lambda_D L} \rightarrow \omega$



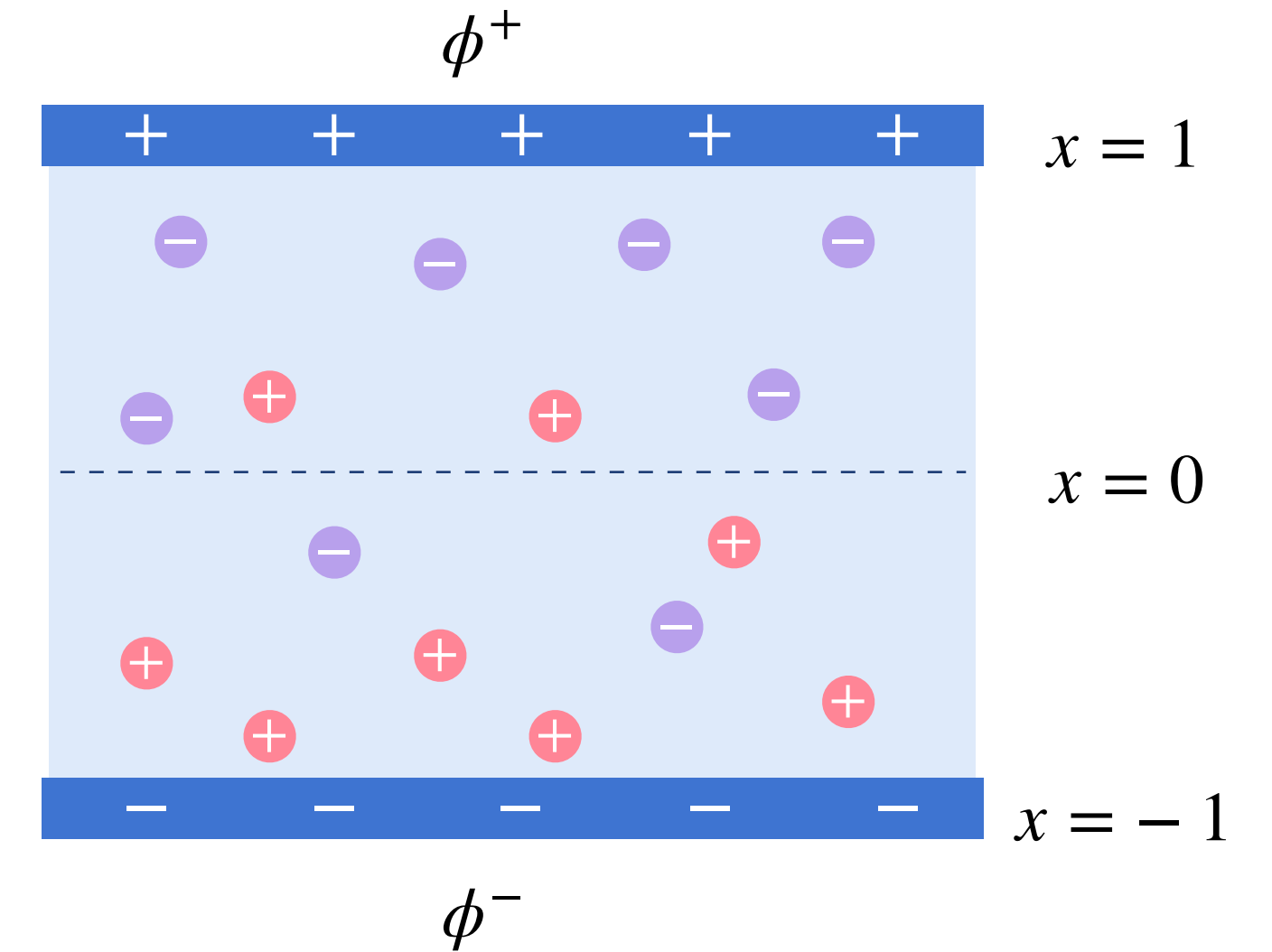
# 一维模型的解析解 无量纲化

## 一维PNP方程

$$\frac{\partial n_{\sigma}}{\partial t} = \epsilon \left[ \frac{\partial^2 n_{\sigma}}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial}{\partial x} \left( n_{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = - \frac{n_{+} - n_{-}}{2\epsilon^2}$$

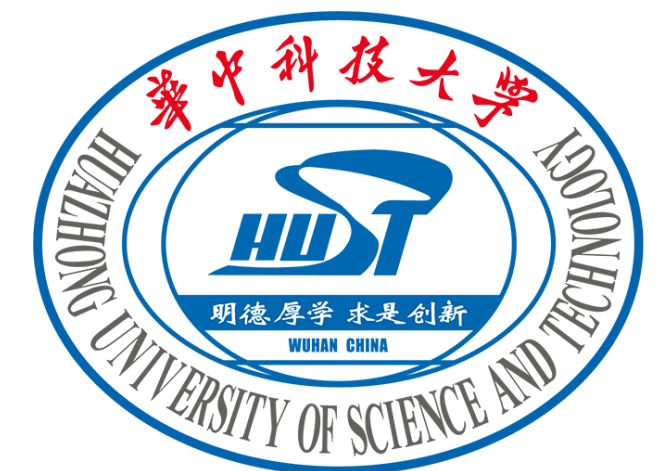
其中  $\epsilon = \lambda_D/L$



## 边界条件

$$\phi(x = \pm 1, t) = \pm \mathcal{V}_0 \cos \omega t, \quad \phi(x = 0, t) = 0$$

$$\left( \frac{\partial n_{\sigma}}{\partial x} + \sigma n_{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \bigg|_{x=\pm 1} = 0, \quad n_{\sigma}(x = 0, t) = 1$$





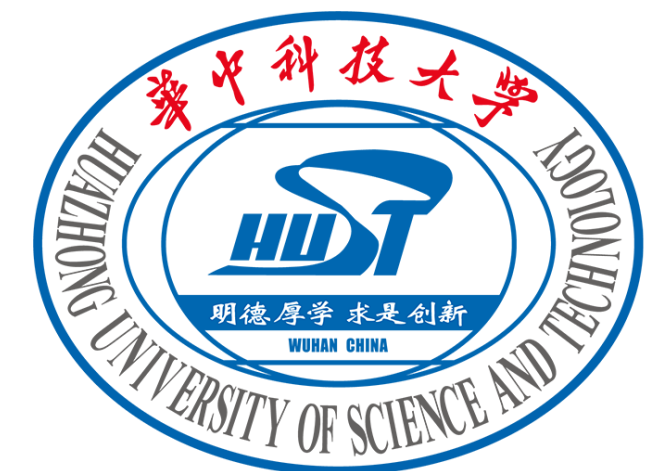
# Fourier展开

当  $\mathcal{V}_0 < 10$  时, 即  $V_0 < 0.26\text{V}$  时 (在室温(300K)状态下, 热电压  $k_B T/e \approx 26\text{mV}$ ), 展开到二阶即可较好拟合 [1]

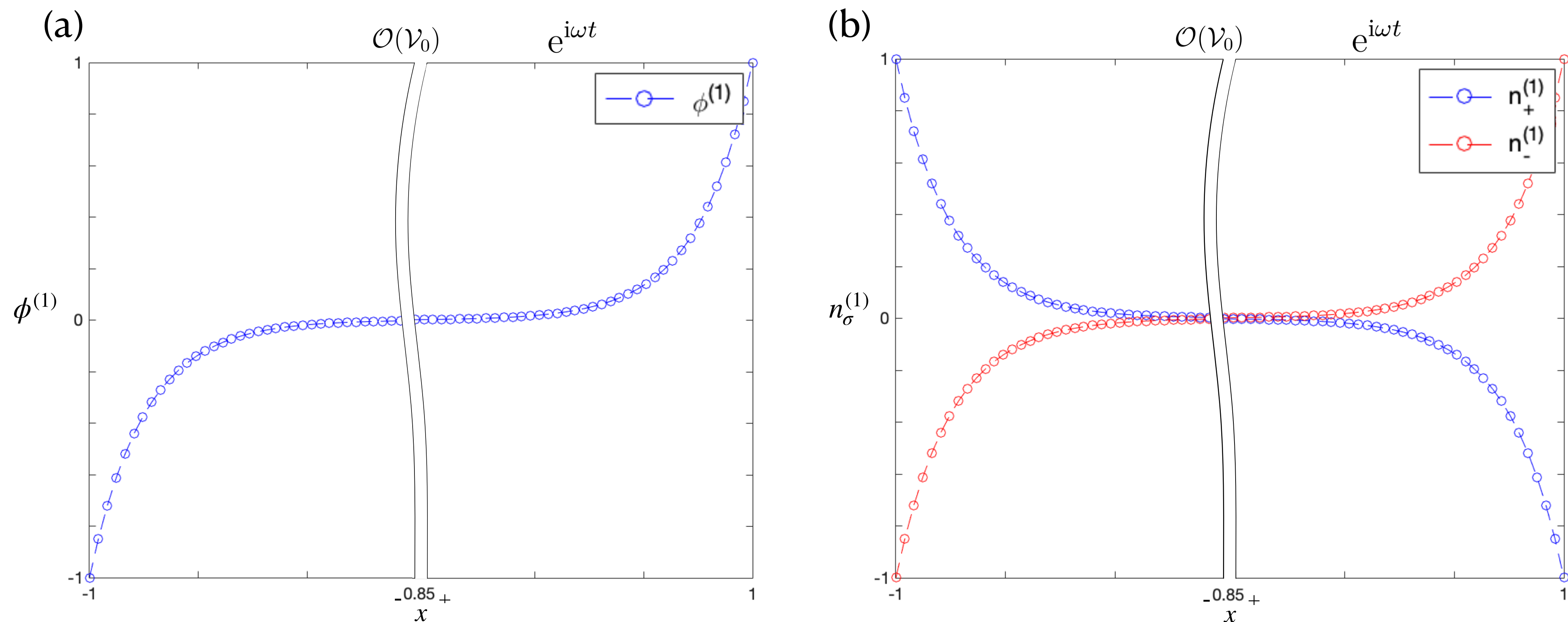
$$\phi(x, t) = \phi_0^{(0)} + \mathcal{V}_0 \left( \phi_1^{(1)} e^{i\omega t} + \phi_{-1}^{(1)} e^{-i\omega t} \right) + \mathcal{V}_0^2 \left( \phi_2^{(2)} e^{2i\omega t} + \phi_0^{(2)} + \phi_{-2}^{(2)} e^{-2i\omega t} \right) + \mathcal{O}(\mathcal{V}_0^3)$$

$$n_\sigma(x, t) = n_{\sigma,0}^{(0)} + \mathcal{V}_0 \left( n_{\sigma,1}^{(1)} e^{i\omega t} + n_{\sigma,-1}^{(1)} e^{-i\omega t} \right) + \mathcal{V}_0^2 \left( n_{\sigma,2}^{(2)} e^{2i\omega t} + n_{\sigma,0}^{(2)} + n_{\sigma,-2}^{(2)} e^{-2i\omega t} \right) + \mathcal{O}(\mathcal{V}_0^3)$$

[1] Stout, Robert F. and Khair, Aditya S. *et al.*



# 求解一阶电势及离子分布

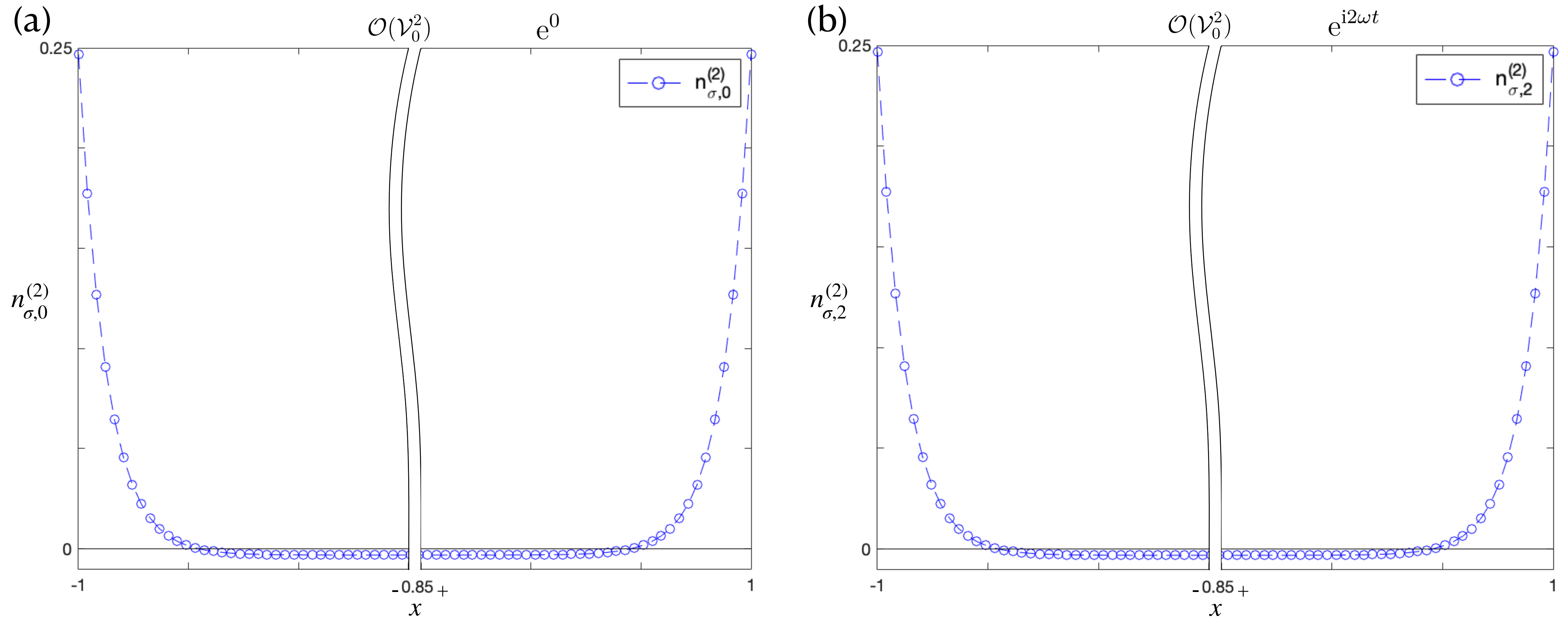


图：  $\omega = 0.01$ ， $\epsilon = 0.025$ ， $t = 0$  时，静电势  $\phi$  和离子密度  $n_\sigma$  的一阶分布。

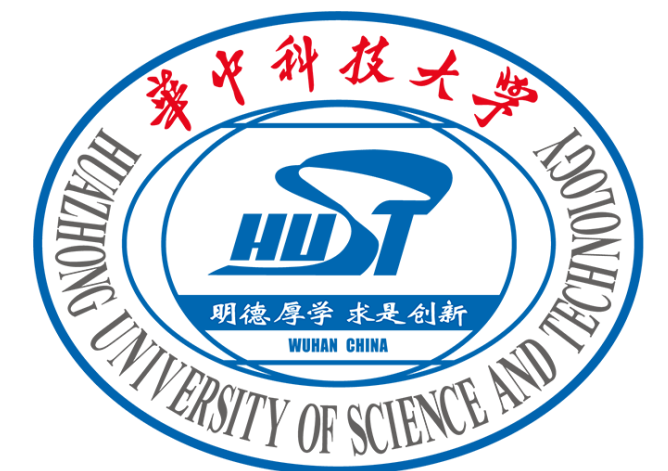
(a)  $\phi(x)$  的一阶分布。(b)  $n_\sigma$  的一阶分布。



# 求解二阶电势及离子分布



图：  $\omega = 0.01$ ，  $\epsilon = 0.025$ ，  $t = 0$  时，  $n_{\sigma}$  的二阶分布。  
(a) 静态分布。(b) 动态分布。

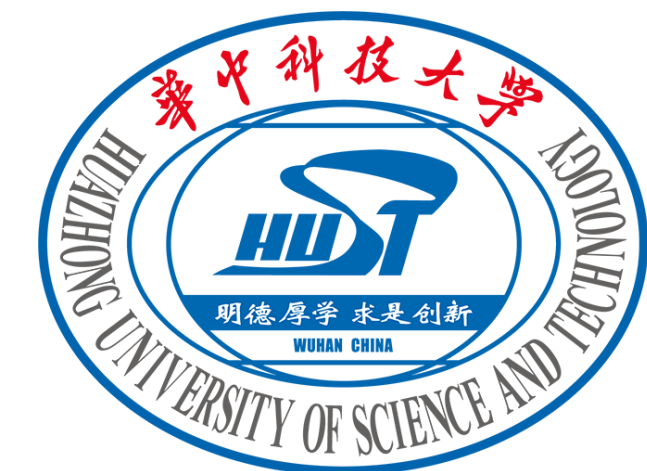




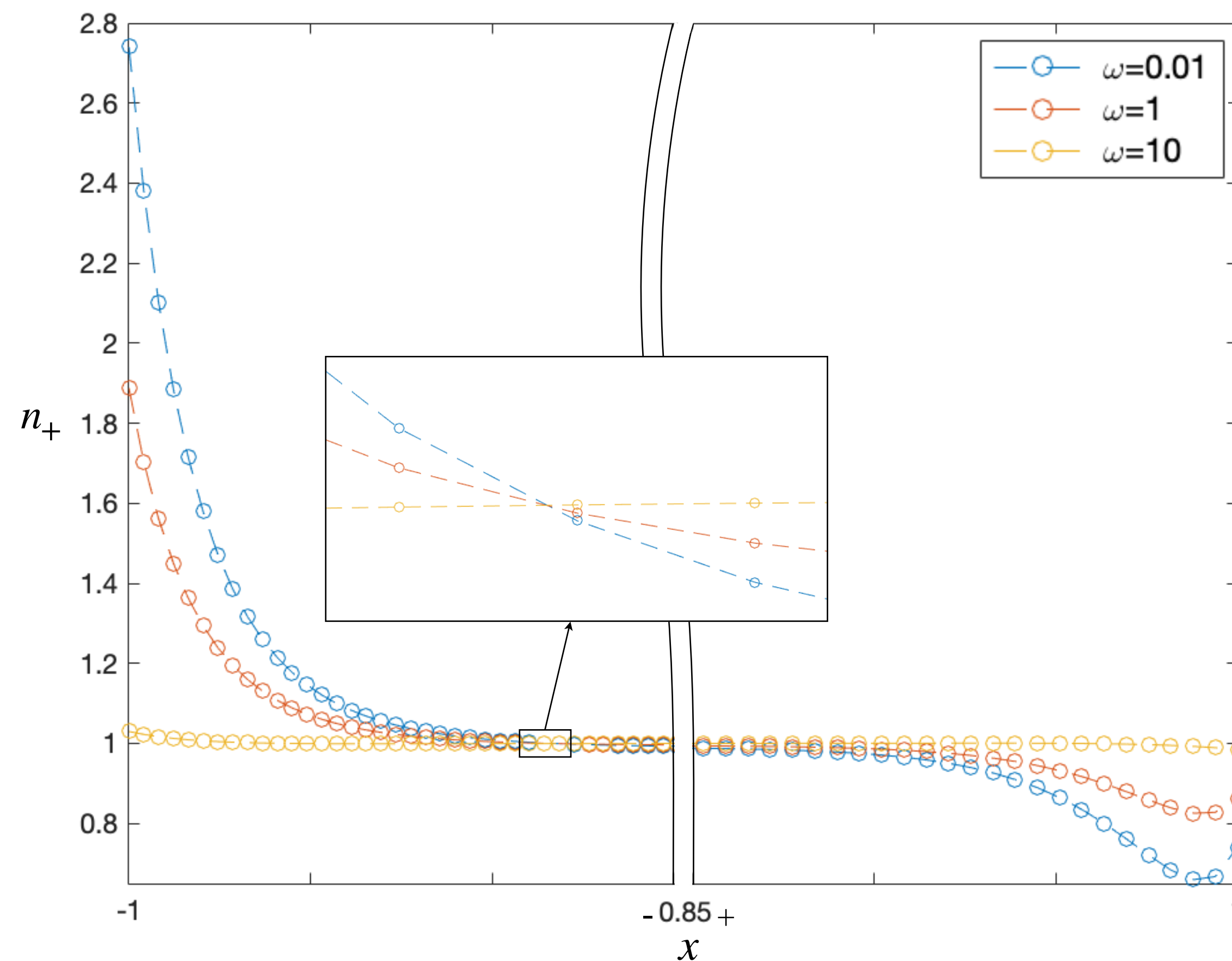
# 一维模型的解析解

$$\phi(x, t) = \phi_0^{(0)} + \mathcal{V}_0 \left[ 2\Re \left( \phi_1^{(1)} e^{i\omega t} \right) \right] + \mathcal{V}_0^2 \left[ 2\Re \left( \phi_2^{(2)} e^{2i\omega t} \right) + \phi_0^{(2)} \right]$$

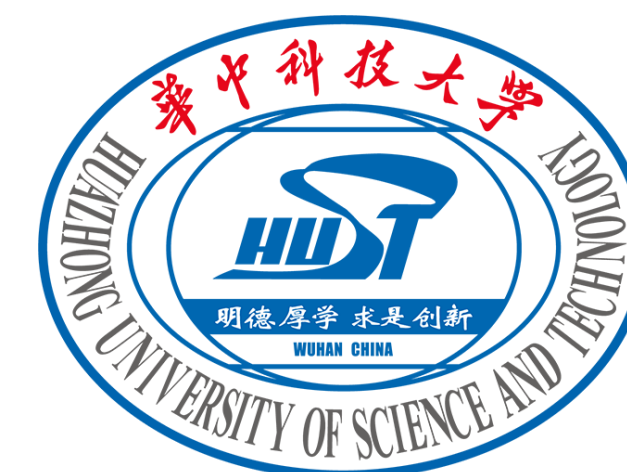
$$n_\sigma(x, t) = n_{\sigma,0}^{(0)} + \mathcal{V}_0 \left[ 2\Re \left( n_{\sigma,1}^{(1)} e^{i\omega t} \right) \right] + \mathcal{V}_0^2 \left[ 2\Re \left( n_{\sigma,2}^{(2)} e^{2i\omega t} \right) + n_{\sigma,0}^{(2)} \right]$$



# 一维模型的解析解



图：在  $\mathcal{V}_0 = 1$ ,  $\epsilon = 0.025$ ,  $t = 0$  时，正离子浓度分布  $n_+$  在不同交流电频率  $\omega = 0.01$ ,  $\omega = 1$ ,  $\omega = 10$  下的分布。



## ① 金刚石NV色心的退相干传感

- ▶ 量子传感与量子传感器
- ▶ 金刚石NV色心的退相干传感
- ▶ 利用量子退相干测量溶液中的自旋

## ② 交流电压下溶液离子分布计算

- ▶ 表面力仪(SFA)与PNP方程
- ▶ 表面力仪的一维模型
- ▶ 一维模型的解析解

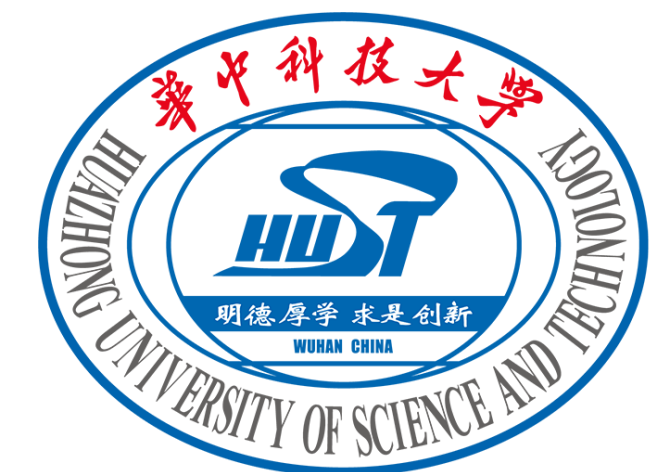
## ③ 总结与展望





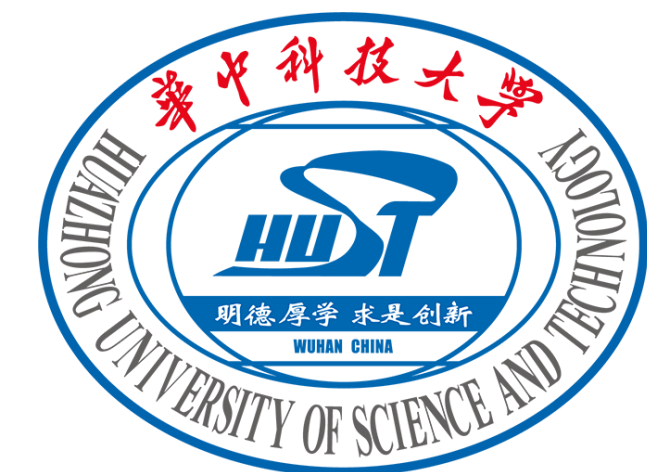
# 总结与展望

- 金刚石NV色心的退相干传感
- 溶液离子浓度分布及电势分布计算



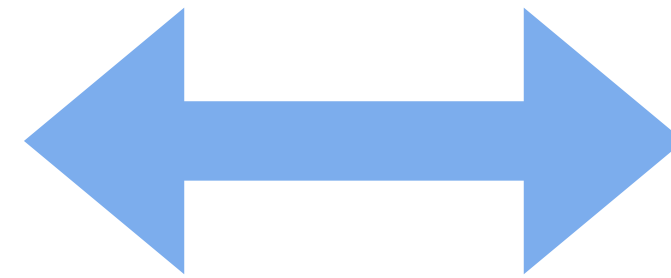
# 总结与展望

- 金刚石NV色心的退相干传感
- 溶液离子浓度分布及电势分布计算



# 总结与展望

量子传感



量子技术

- 更长的相干时间
- 更高效的输出过程
- 更高的灵敏度

