

# 从核介质中的 $\alpha$ 关联到重核中的 $\alpha$ 衰变现象的理论研究

报 告 人：郑海蓝

指导老师：任中洲、邓达铭

单 位：同济大学 物理科学与工程学院

日 期：2024. 11. 17

第三届“粤港澳”核物理论坛，广东深圳，2024年11月15日-18日



# 报告提纲

## 1 背景介绍

- 核介质中的 $\alpha$ 关联及其引起的 $\alpha$ 结团内禀运动—— $\alpha$ 结团介质效应

## 2 重核中 $\alpha$ 关联演化: $\alpha$ -核势中口袋结构的形成

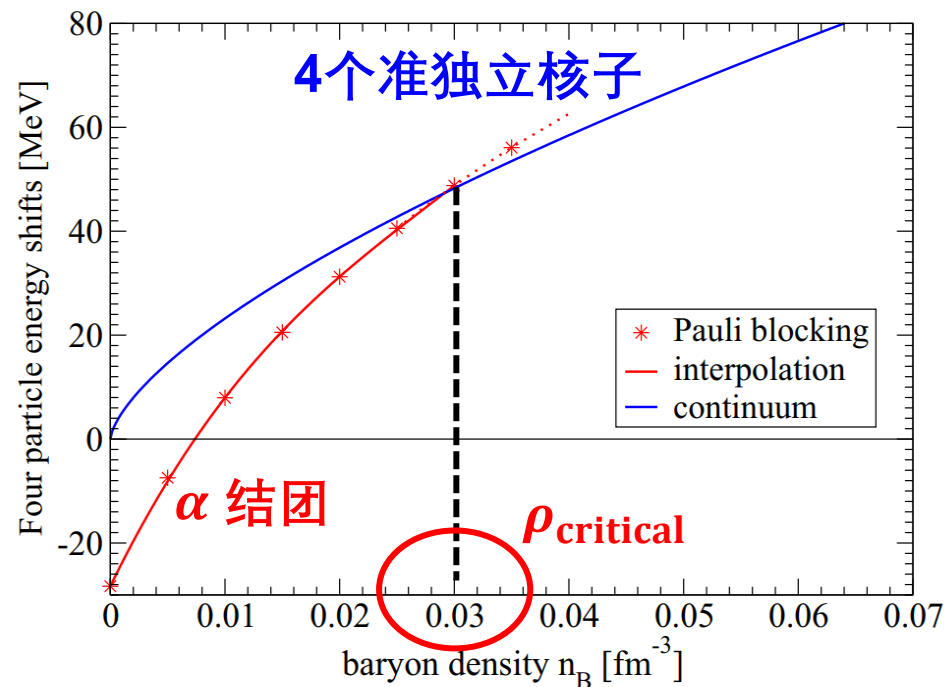
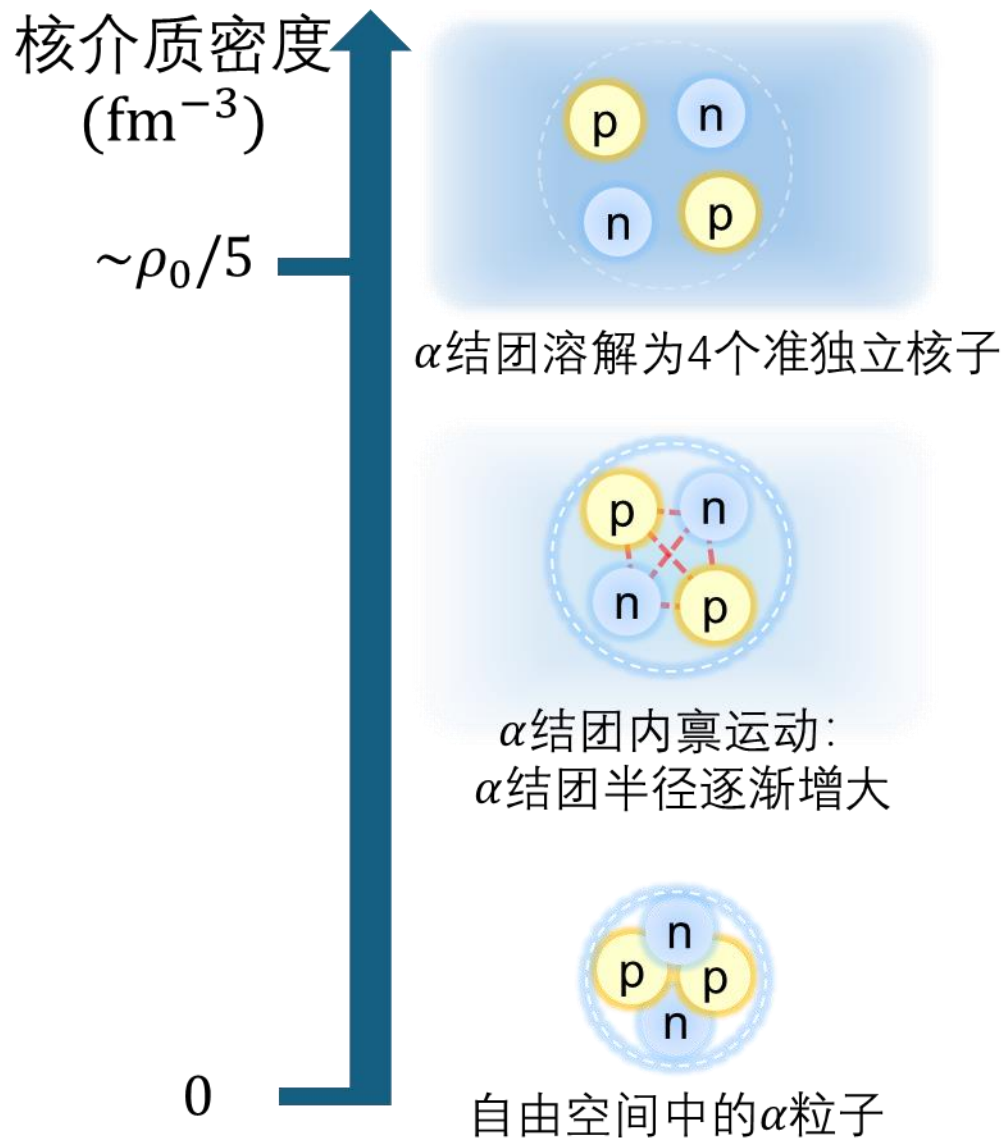
- 考虑 $\alpha$ 关联演化的 $\alpha$ 衰变结团模型: 口袋型动力学双折叠模型 (Pocket-type DD FP)

## 3 理论计算结果

- $\alpha$ 衰变半衰期
- 利用 $\alpha$ 衰变实验数据提取子核电荷半径

## 4 总结

# 核介质中的 $\alpha$ 关联演化及其引起的 $\alpha$ 结团内禀运动—— $\alpha$ 结团介质效应

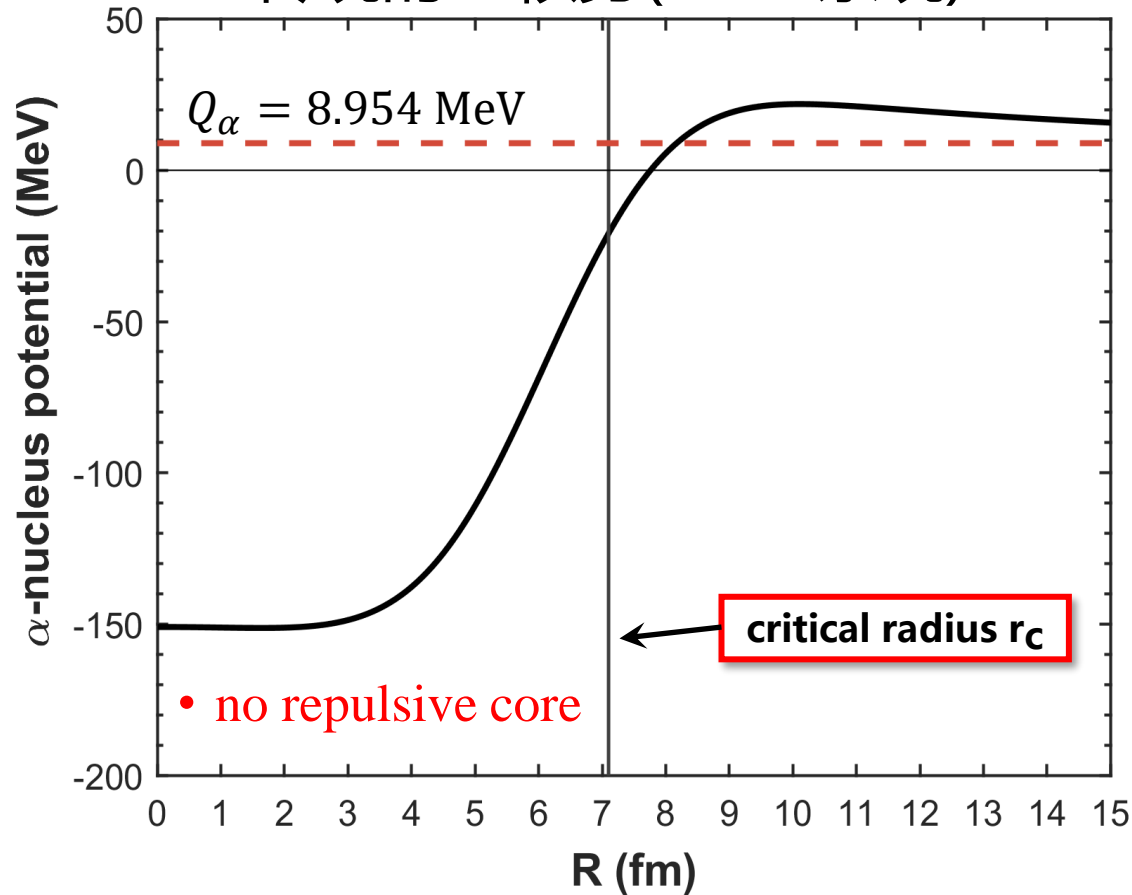


- $\alpha$  关联强度随着介质密度增大迅速减小;
- $\alpha$  关联在临界密度  $\rho_{\text{critical}} \approx \rho_0/5$  消失;
- $\alpha$  结团形成在重核表面, 不能自由地进入重核内部;

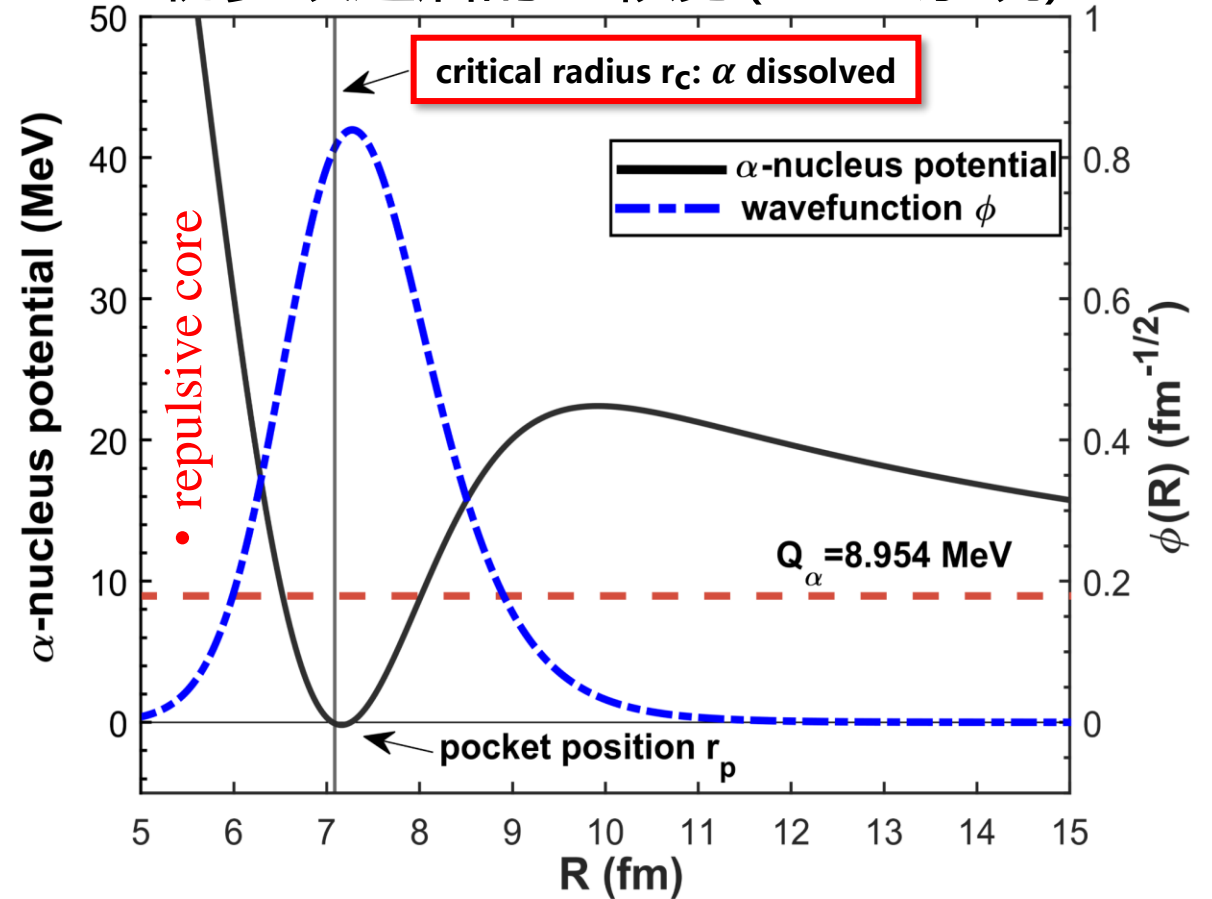
G. Röpke *et al.*, *Phys. Rev. C* 90, 034304 (2014)

# 重核中 $\alpha$ 关联演化: $\alpha$ -核势中口袋结构的形成

传统的 $\alpha$ -核势( $^{212}\text{Po}$ 系统)



初步改进后的 $\alpha$ -核势( $^{212}\text{Po}$ 系统)



➤ 考虑饱和密度处对 $\alpha$ 关联的抑制作用:  $\alpha$ -核势内部形成排斥芯, 表面形成口袋结构

然而,  $\alpha$ -核势口袋位置及 $\alpha$ 波函数峰值位置接近临界半径  $r_c$ , 这与微观计算结论不符!

# 重核中 $\alpha$ 关联演化: $\alpha$ -核势中口袋结构的形成

考虑 $\alpha$ 结团介质效应——通过动力学双折叠过程构造 $\alpha$ -核势

$$\begin{aligned} V_N(\mathbf{R}) &= \int \rho_d(\mathbf{r}_d) \rho_\alpha[\mathbf{r}_\alpha, \rho_d(\mathbf{R})] v_N(\mathbf{r}_d, \mathbf{r}_\alpha, s) d\mathbf{r}_d d\mathbf{r}_\alpha, \\ V_C(\mathbf{R}) &= \int \rho_d(\mathbf{r}_d) \rho_\alpha[\mathbf{r}_\alpha, \rho_d(\mathbf{R})] v_C(s) d\mathbf{r}_d d\mathbf{r}_\alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

➤ 介质密度依赖的 $\alpha$ 结团密度分布:

$$\rho_\alpha[\mathbf{r}_\alpha, \rho_d(\mathbf{R})] = \rho_{\alpha,s}[\rho_d(\mathbf{R})] \exp\{-\beta[\rho_d(\mathbf{R})] r_\alpha^2\} \quad (2)$$

➤ 介质效应通过密度依赖项 $x(\mathbf{r}_d, \mathbf{r}_\alpha, \mathbf{R})$ 影响核子核子相互作用强度:

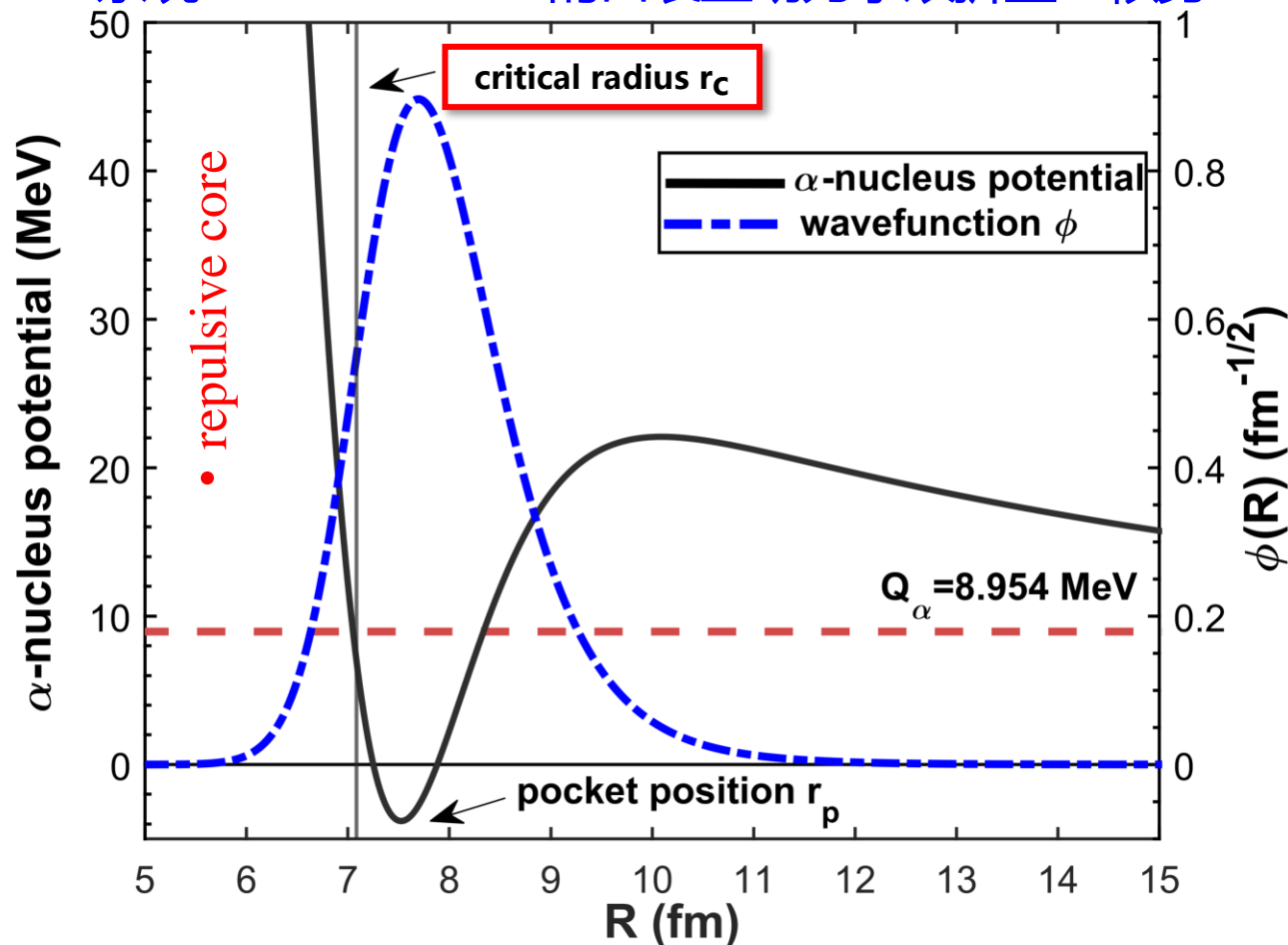
• Migdal NN 相互作用:  $v_N(\mathbf{r}_d, \mathbf{r}_\alpha, s) = C_0 \{ F_{in} x(\mathbf{r}_d, \mathbf{r}_\alpha, \mathbf{R}) + F_{ex} [1 - x(\mathbf{r}_d, \mathbf{r}_\alpha, \mathbf{R})] \} \delta(s), \quad (3)$

• 相对密度: 
$$x(\mathbf{r}_d, \mathbf{r}_\alpha, \mathbf{R}) = \frac{\rho_d(\mathbf{r}_d) + \rho_\alpha(\mathbf{r}_\alpha, \rho_d(\mathbf{R}))}{\rho_{00}(\mathbf{R})},$$

• 平均饱和密度: 
$$\rho_{00}(\mathbf{R}) = \frac{\rho_{d,s} + \rho_{\alpha,s}(\mathbf{R})}{2}.$$

# 重核中 $\alpha$ 关联演化: $\alpha$ -核势中口袋结构的形成

系统 $^{212}\text{Po}$ :  $^{208}\text{Pb} + \alpha$ 的口袋型动力学双折叠 $\alpha$ -核势



## 口袋型动力学双折叠势 (Pocket-type DDFP)

介质效应对 $\alpha$ -核势带来的影响:

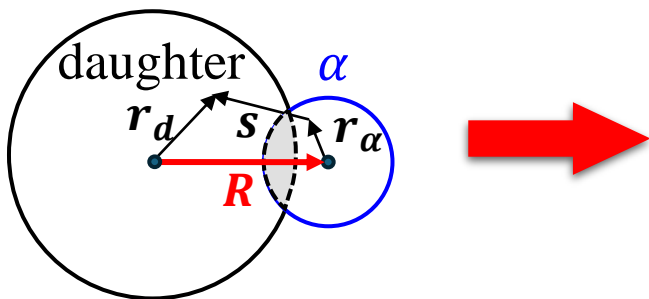
- 口袋结构和 $\alpha$ 结团波函数都移动到临界密度 $r_c$ 以外的表面区域.
- 第一个经典转折点 $r_1$  ( $V(r_1) = Q_\alpha$ ) 与 $r_c$ 位置非常接近.

➤ Pauli强排斥作用抑制  $\alpha$  结团形成于子核内部( $R < r_c$ ).  
核介质效应与口袋结构的位置( $\alpha$ 结团形成的位置)密切相关

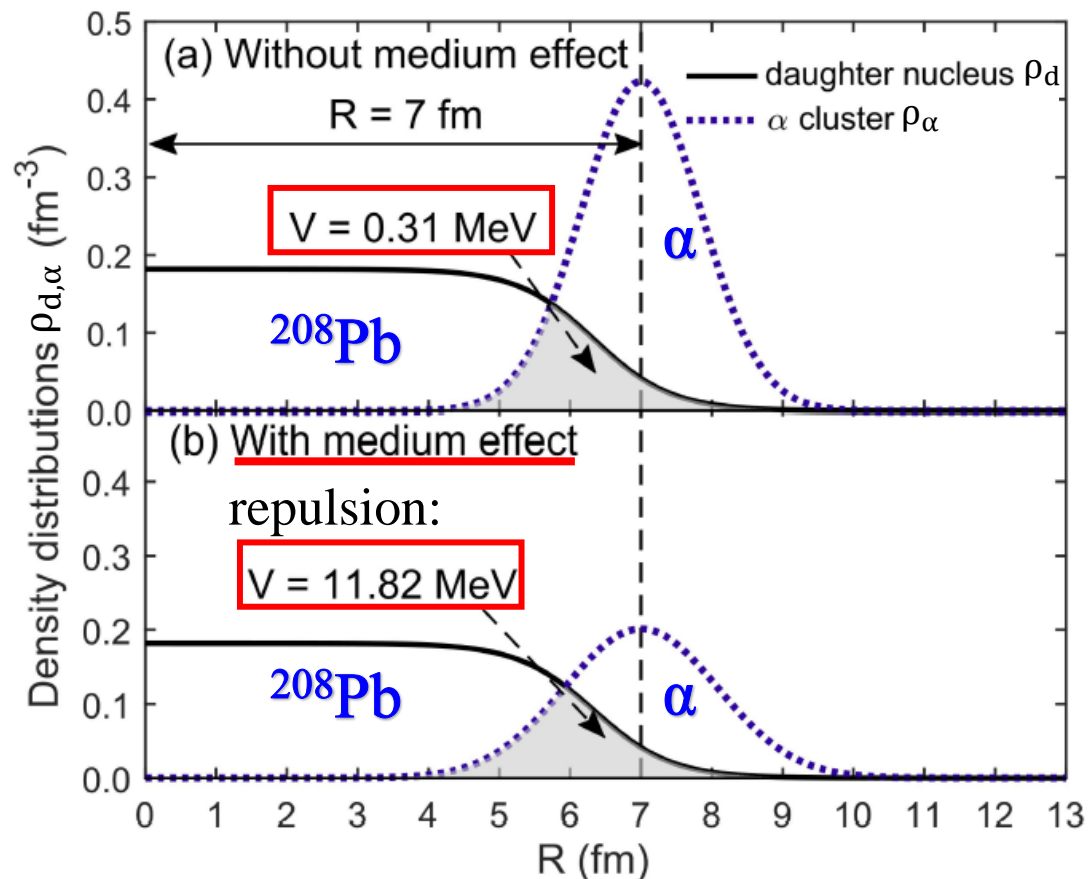
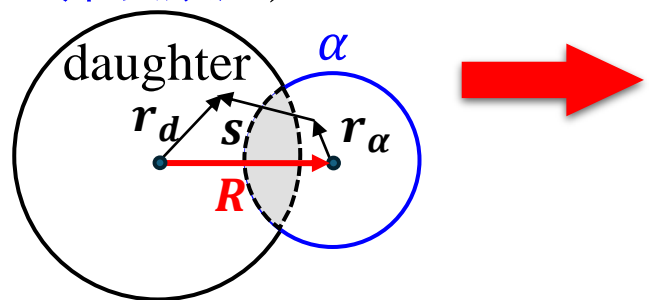
# 介质效应引起的 $\alpha$ 结团内禀运动对 $\alpha$ -子核相互作用的影响

质心间距为 $R = 7$  fm时 $\alpha$ 结团与子核的密度交叠 (灰色阴影部分)

(a) 自由空间的 $\alpha$ 粒子密度分布(未计入介质效应)

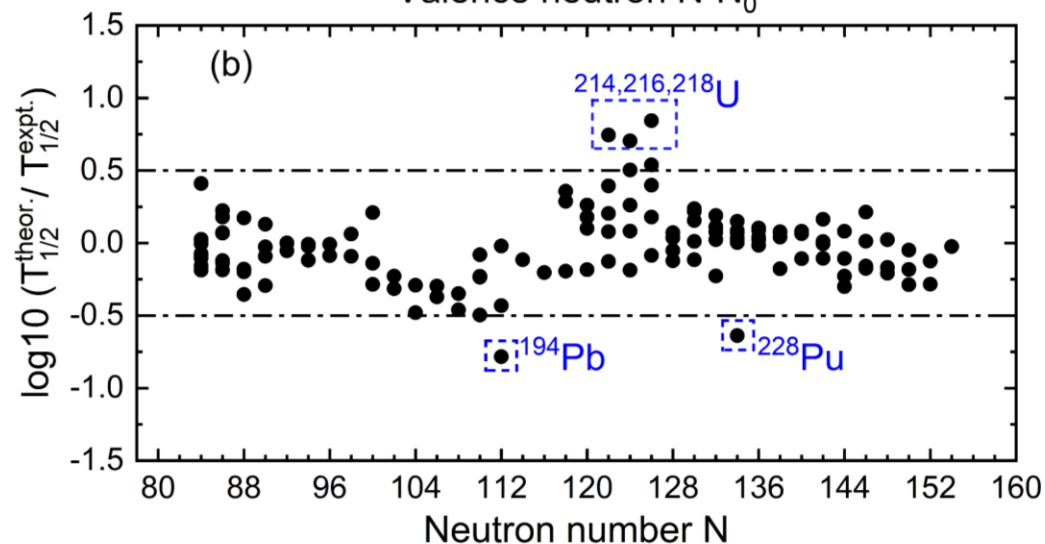
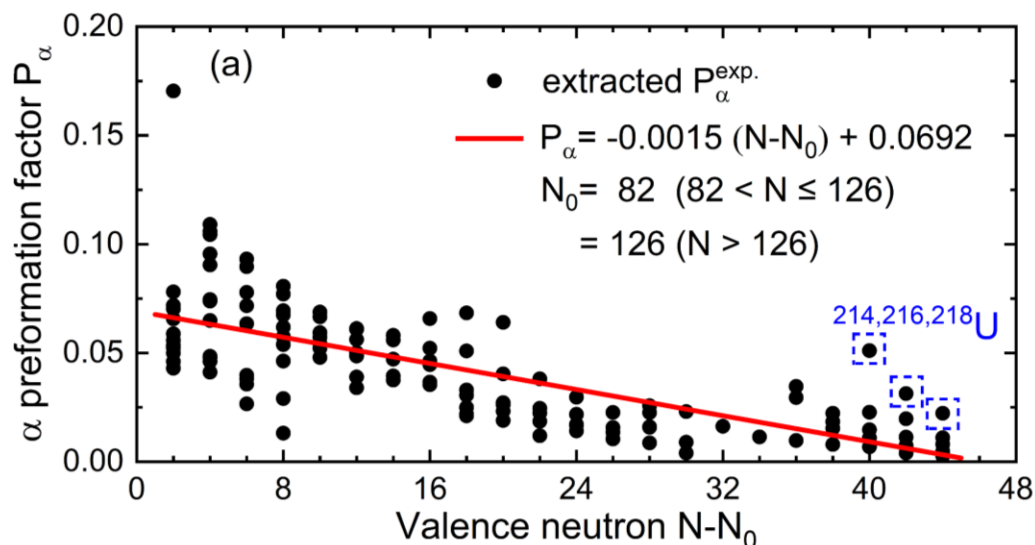


(b) 核介质中的 $\alpha$ 结团具有更松散的密度分布 (计入介质效应)



介质效应使得 $\alpha$ 结团与子核的密度交叠增大，这导致 $\alpha$ 结团在相同质心间距 $R$ 处受到更强的Pauli 排斥作用

# 利用Pocket-type DDFP模型系统计算 $\alpha$ 衰变半衰期



(a)  $\alpha$ 预形成因子及其价中子依赖性(红线)

(b) 对数坐标下半衰期理论值与实验值偏差

$\alpha$  衰变半衰期:

$$T_{1/2}^{\text{theor.}} = \frac{\hbar \ln 2}{P_\alpha^{\text{inp.}} \Gamma}$$

两势法计算 $\alpha$  衰变宽度:

$$\Gamma = \frac{\hbar^2}{\mu k} |\phi(\bar{R}) [\alpha \chi_l(\bar{R}) + \chi_l'(\bar{R})]|^2$$

价中子数依赖的 $\alpha$  预形成因子:

$$P_\alpha^{\text{inp.}} = -0.0015(N - N_0) + 0.0692$$

理论值 $T_{1/2}^{\text{theor.}}$  与实验值 $T_{1/2}^{\text{exp.}}$  的偏差

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \log_{10} \frac{T_{1/2,i}^{\text{theor.}}}{T_{1/2,i}^{\text{exp.}}} \right| = 0.182$$

平均偏差因子:

$$S = 10^\sigma = 1.521$$

Pocket-type DDFP 模型能够很好地描述 $\alpha$ 衰变半衰期!



# 利用Pocket-type DDFP模型及 $\alpha$ 衰变实验数据提取子核电荷半径

表: 不同 $\alpha$ 衰变结团模型提取子核电荷半径结果比较

结团模型	电荷半径方均根偏差 $\sigma_{\text{ch.}}$ (fm)
Pocket-type DDFP (present)	0.0420
GDDCM (Ni, PRC, 2013)	0.1284
GDDCM <sup>*</sup> (Qian, JPG, 2018)	0.0900

➤ 与过去的GDDCMs相比, 新模型采用**更少的参数**, 并且电荷半径计算方均根偏差下降了约 **53.3 %** .

**计算准确度的显著提高说明计入重核中 $\alpha$ 关联演化对于准确描述 $\alpha$ -核势具有重要意义!**

# 总结

- 从核介质中的 $\alpha$ 关联出发解释了 $\alpha$ -核势中口袋结构的形成，并发展了一种考虑重核中 $\alpha$ 关联演化的 $\alpha$ 衰变结团模型——口袋型动力学双折叠势模型(Pocket-type DDFP)。 H. Zheng, D. Deng, and Z. Ren, PRC 109, L011301 (2024)

- 饱和密度附近 $\alpha$ 关联被抑制:  $\alpha$ 结团无法形成,  $\alpha$ -核势出现排斥芯以及表面口袋结构
- 低密度表面 $\alpha$ 关联强度变化:  $\alpha$ 结团内禀动力学演化(介质效应) 与口袋结构位置密切相关

- 通过半衰期以及电荷半径计算检验了新模型。新模型能够很好的重现实验半衰期。并且在使用更少参数的前提下, 新模型在电荷半径的计算中有显著的提高。 H. Zheng, D. Deng, and Z. Ren, to be published

Thank you!