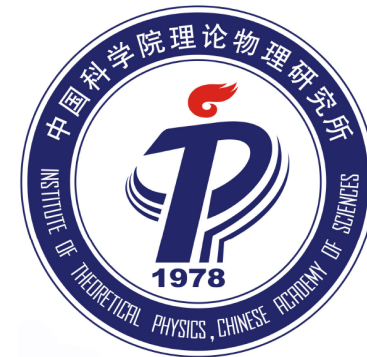


# Systematic study of spin-excitation mechanism in Time-Dependent Hartree-Fock Theory

戴高峰

中国科学院理论物理研究所  
理论物理国家重点实验室

导师：郭璐（中国科学院大学）  
周善贵（中科院理论所）



# Time-Dependent Hartree-Fock理论

TDHF理论最先由Bonche、Koonin和 Negele发展而来。

Phys. Rev. C**13**, 1226 (1976)

20世纪70、80年代许多研究组进行了二维或者三维的计算，但是受计算机性能的限制。大多数只作二维计算，三维计算则没有自旋-轨道耦合项。

现代计算机技术的进步，可以利用高性能计算机作计算，如今三维无约束包含完整Skyrme能量密度的TDHF理论可以应用到：重离子碰撞、巨共振等领域。

# Time-Dependent Hartree-Fock理论

静态平均场模型可以很好地描述原子核基态性质。

在特定的时刻给定一个态 $|\phi(t)\rangle$ ，唯一的决定了与平均场哈密顿量相关的粒子密度矩阵 $\rho(t)$ 。

下一时刻的状态波函数可以由薛定谔方程决定：
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\phi(t)\rangle = \hat{H} |\phi(t)\rangle$$

# Time-Dependent Hartree-Fock理论

描述原子核的波函数可以由Hartree-Fock近似为

$$|\text{HF}\rangle = |\phi(1, 2, \dots, A)\rangle = \prod_{i=1}^A a_i^\dagger |0\rangle$$

Hartree-Fock能量:

$$E^{\text{HF}} = \sum_{l_1 l_2} t_{l_1 l_2} \rho_{l_2 l_1} + \frac{1}{2} \sum_{k_1 k_2} \rho_{l_1 l_3} \bar{v}_{l_1 l_2 l_3 l_4} \rho_{l_2 l_4}$$



静态解:

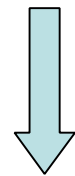
$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + \Gamma_{\text{H}}(r) \right] \varphi_k(r) + \int dr' \Gamma_{\text{ex}}(r, r') \varphi_k(r') = \epsilon_k \varphi_k(r)$$

# Time-Dependent Hartree-Fock理论

时间依赖的波函数:  $|\psi(t)\rangle = e^{-iHt/\hbar}|\psi(0)\rangle$ .

动力学方程

$$i\hbar\dot{\rho}_{kl} - [t + \Gamma, \rho]_{kl} = \frac{1}{2} \sum_{prs} \bar{v}_{kprs} g_{rslp}^{(2)} - \bar{v}_{rslp} g_{kprs}^{(2)}$$



自洽平均场近似

TDHF方程:

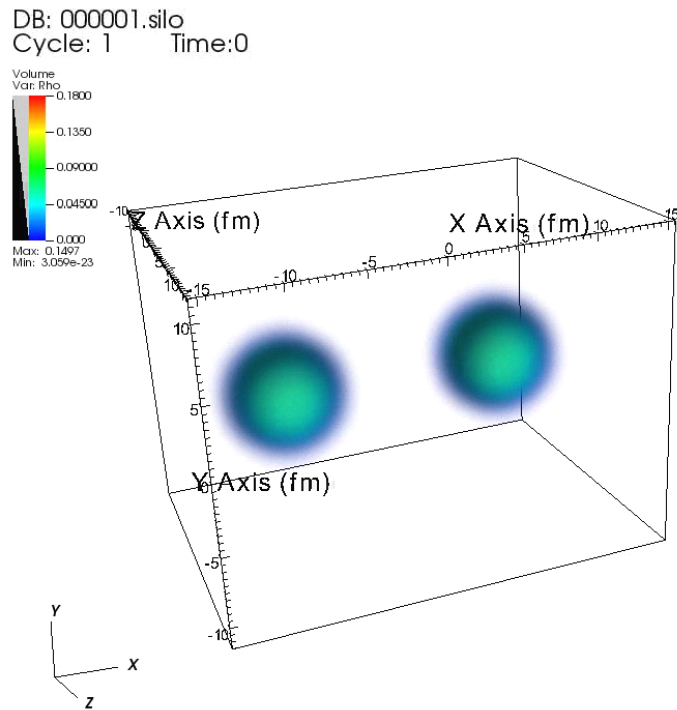
$$i\hbar\dot{\rho} = [h, \rho]$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \varphi_i(r, t) = \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + \Gamma_H(r, t) \right] \varphi_i(r, t) + \int dr' \Gamma_{Ex}(r, r', t) \varphi_i(r', t).$$

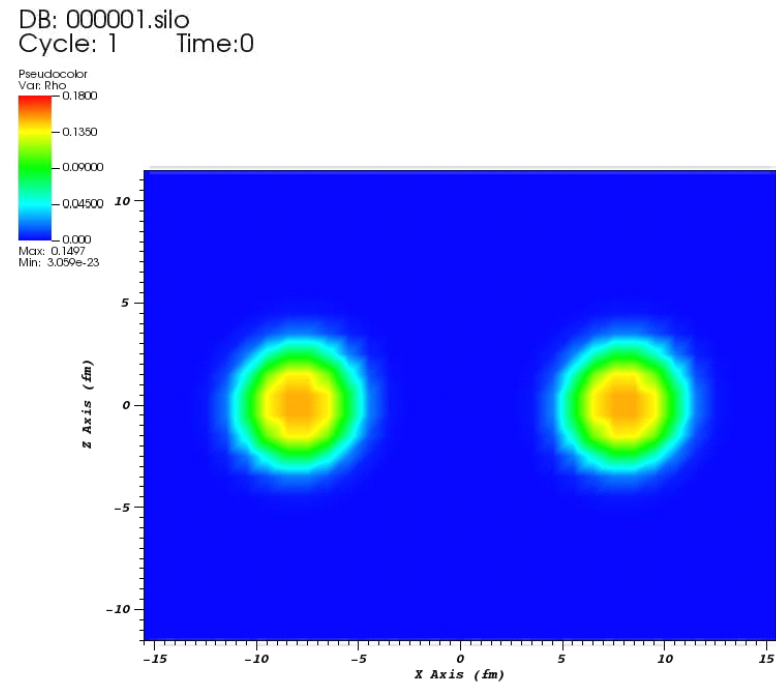
我们由静态解的Slater行列式作为初始时刻的波函数，并且假设波函数随时间不改变它的Slater行列式形式。

# TDHF理论模拟结果

Case:  $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ ,  $b=0$  fm,  $E_{\text{cm}}=100$  MeV



user: gaofeng  
Sat May 4 17:06:04 2013

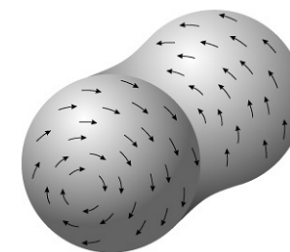


user: gaofeng  
Sat May 4 17:12:06 2013

# 自旋-扭模式激发

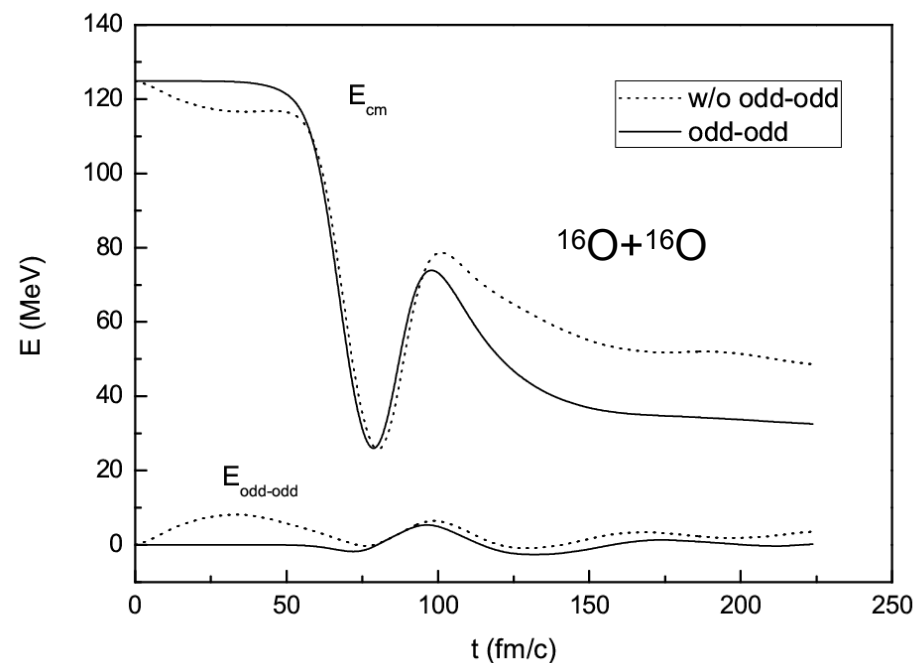
在重离子熔合反应中，系统的激发情况至关重要。我们有必要对自旋-扭模式的碰撞激发作系统的研究。

$$E_{ls}^{(odd)} = - \int d^3r (b_4 \vec{\sigma} \cdot (\nabla \times \vec{j}) + b'_4 \sum_q \vec{\sigma}_q \cdot (\nabla \times \vec{j}_q))$$



碰撞时由于自旋密度的旋转方向不同导致的激发

自旋轨道奇时间项提供了额外的能量耗散



J. A. Maruhn, et al., Phys. Rev. C, 74, 027601 (2006)

考虑与不考虑奇时间自旋轨道耦合对能量耗散的影响

VOLUME 56, NUMBER 26

PHYSICAL REVIEW LETTERS

30 JUNE 1986

## Resolution of the Fusion Window Anomaly in Heavy-Ion Collisions

A. S. Umar<sup>(a)</sup> and M. R. Strayer

*Physics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831*

and

P.-G. Reinhard<sup>(b)</sup>

*Joint Institute for Heavy Ion Research, Oak Ridge, Tennessee 37831*

(Received 7 April 1986)

Time-dependent Hartree-Fock theory is used to study fusion in  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  collisions. The Hamiltonian density is obtained from Skyrme forces including the spin-orbit interaction. The inclusion of spin has a dramatic effect on the observed dissipation for central collisions. At a center-of-mass energy of 34 MeV, fusion is found for all angular momenta less than the experimental critical angular momentum. Thresholds for inelastic scattering increase to a bombarding energy per nucleon of about 9 MeV. The decrease in transparency is in general agreement with experiment.

PACS numbers: 25.70.Jj, 21.60.Jz

$E_{\text{cm}}$  (MeV)

$E_{\text{cm}}$  (MeV)



# 系统研究自旋激发

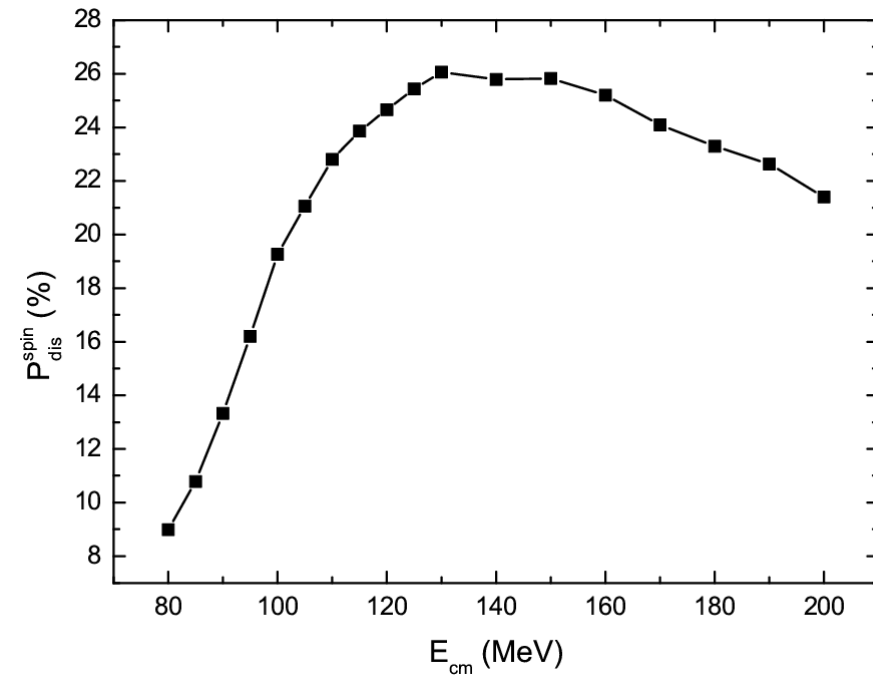
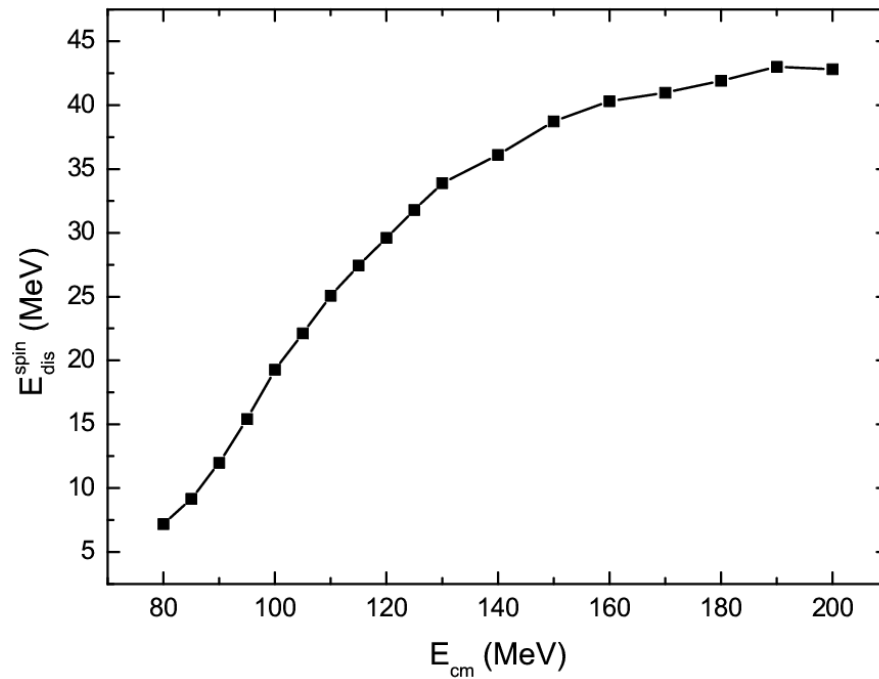
Case

$^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$

$b=0$

自旋激发耗散能:  $E_{\text{dis}}^{\text{spin}} = E_{\text{dis}}^{\text{ls}} - E_{\text{dis}}^{\text{nls}}$

自旋激发耗散比:  $P_{\text{dis}}^{\text{spin}} = P_{\text{dis}}^{\text{ls}} - P_{\text{dis}}^{\text{nls}}$



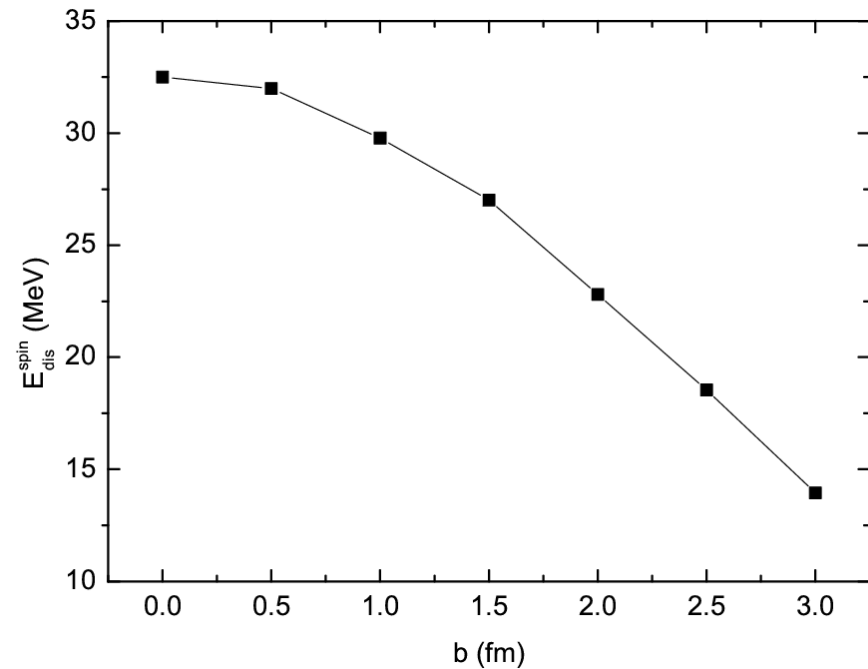
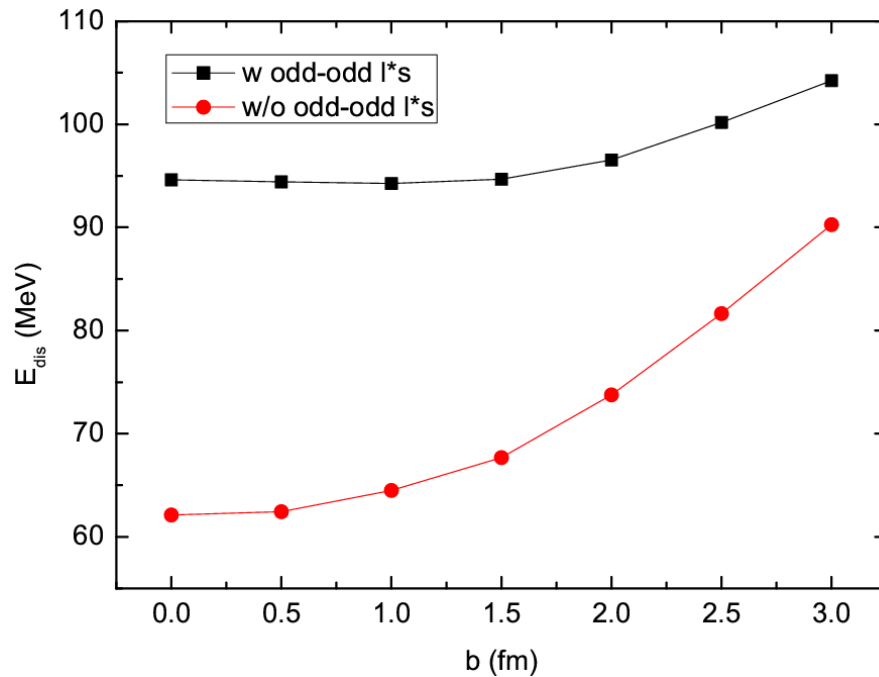
# 系统研究自旋激发

Case

$^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$

$E_{\text{cm}}=125\text{ MeV}$

能量耗散与自旋-扭效应所导致的能量耗散与碰撞参数的关系



## 总结:

我们运用TDHF理论系统研究了60-90°的非弹散射

- 1、得到了质心能量耗散与入射能量的变化关系。
- 2、考虑奇时间自旋轨道耦合后，耗散增加。
- 3、得到了自旋-扭模式的激发所导致的能量耗散与入射能量的关系，可能存在一个耗散饱和的值。
- 4、得到了自旋-扭模式的激发所导致的能量耗散与碰撞参数的关系。