

文章编号: 1007-4627(2004)04-0374-05

QMD 模型的改进及其在低能重离子反应中的应用*

王 宁², 李祝霞^{3, 1, 2}, 吴锡真³

(1 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080;

3 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 丰中子核以及重核熔合机制的研究以及中能重离子碰撞中多重碎裂的研究都迫切需要一个统一的、自洽的微观动力学模型. 经过对量子分子动力学模型进行根本的改进, 发展了一个新的、适用于低能以及中能重离子反应的统一描述的微观动力学模型. 改进的量子分子动力学 (ImQMD) 模型能够将整个熔合反应过程中的动力学效应、同位旋效应以及弹靶质量不对称效应等比较全面地、自洽地考虑进来, 从而给熔合反应的研究提供了一个新的途径. ImQMD 模型能够很好地再现一系列核的基态性质以及 10 多个熔合反应的激发函数 (包括丰中子核熔合体系以及实验最新测量的 $^{132}\text{Sn} + ^{64}\text{Ni}$ 熔合体系). 此外还运用该模型初步探索了重核熔合过程中复合体系的寿命与体系的入射能量、体系大小以及体系的中子质子比的依赖关系.

关键词: 改进的量子分子动力学模型; 丰中子核; 重核; 熔合截面; 复合体系寿命

中图分类号: O571.4 **文献标识码:** A

1 引言

超重元素的合成是近几年核物理研究中非常关注的话题之一, 新的实验结果^[1]表明产生和研究所所谓的“稳定岛”区域元素有一定的可能性. 而这些昂贵的实验需要坚固的理论支持, 包括选用更合理的弹靶体系、入射能量、对截面更好地估计以及对蒸发残余核清楚地鉴别等. 根据壳模型预言超重岛处于 $Z=114$ 或 120 , $N=184$ 这个区域, 这个区域的中子数远远大于质子数, 因此人们试图通过丰中子体系的熔合登上超重岛. 另一方面, 在重核熔合过程中, 由于相互作用引起的两核的动态形变、颈部的形成、核子的转移以及复合核的能量耗散等动力学效应对熔合截面有一定的影响, 研究这些动力学效应对于弄清重离子熔合机制有着十分重要的作用, 因此开展丰中子核以及重核熔合的动力学机制研究非常必要.

对于丰中子核以及重核熔合的描述, 耦合道模型^[2]以及宏观动力学模型^[3]都遇到了很大的困难.

这是因为重体系熔合过程涉及到的自由度极大, 如动力学效应、同位旋效应以及质量不对称效应等等, 而这些模型很难将这些数目极大的自由度比较全面自洽地考虑进来. 另一方面, 目前在重体系熔合研究中, 人们将熔合过程划分为几个不同的阶段, 对不同阶段采用不同的模型来描述^[3, 4], 而各阶段之间的衔接仍然存在一定的问题, 因此迫切需要发展一个微观的动力学模型对整个熔合过程进行统一、自洽地描述.

量子分子动力学 (QMD) 模型是一个半经典的微观动力学输运模型, 它是在 N 个核子形成的 $6N$ 维的相空间来自洽统一地描述整个反应的动力学过程. 一方面它对核反应过程的描述是从一个整体的角度出发的, 它考虑的自由度比较全面, 能直接将体系动态演化与位垒变化以及熔合截面改变等有机地联系在一起, 有利于分析熔合机制. 另一方面相对于 AMD 和 FMD 模型, QMD 模型的运算较快, 适合于研究非常重的弹靶反应, 因此用 QMD 模型

收稿日期: 2004 - 08 - 16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10347142, 19975073, 10175093, 10175089); 博士后自然科学基金资助项目

作者简介: 王 宁(1976--), 男(汉族), 陕西蒲城人, 博士后, 从事重离子碰撞与熔合反应理论研究;

E-mail: wangning@itp.ac.cn

来研究重离子熔合反应中的动力学机制及同位旋效应是非常有意义的而且有一定的可行性.

然而常规的 QMD 模型对于研究低能熔合反应的描述还存在很大的困难. 一方面低能反应中核体系的量子效应以及结构效应比较明显, 需要对核体系波函数的反对称化进行更好地考虑, 如何在 QMD 模型中引入泡利原理是将 QMD 模型推广到低能、中能重离子反应的重要一步. 另一方面由于低能熔合反应的过程比较缓慢, 持续时间比较长(数千个 fm/c), 这对单个核的稳定性提出了相当高的要求. 如果单个核的稳定性较差, 则会发生大量虚的粒子发射, 而这种虚的粒子发射能严重地影响计算结果的正确性, 因此单个核的稳定性一定要好. 常规的 QMD 模型对这两个方面都很难保证, 因此直接用常规的 QMD 模型研究近垒重离子熔合反应还比较困难.

本工作一方面是发展一个适用于低能以及中能重离子反应的统一的微观动力学模型, 另一方面是在此基础上应用该模型研究近垒重离子熔合反应(特别是丰中子核以及重核的近垒熔合反应)机制及其动力学. 关于改进的量子分子动力学(ImQMD)模型详细的介绍请参看文献[5, 6].

2 近垒重离子熔合反应

由反应截面的定义可以知道它表示一个入射粒子同单位面积靶上的一个靶核发生反应的概率. 如果得到一定的人射能量和碰撞参数下的熔合几率 $g_{fus}(E, b)$, 则熔合截面可以写为

$$\sigma_{fus}(E) = 2\pi \int_0^{b_{max}} g_{fus}(E, b) b db. \quad (1)$$

如果 $g_{fus}(E, b) = 1$, 便得到经典的几何截面 $\sigma_{fus}(E) = \pi b_{max}^2 = \pi R_0^2$. 而真实情况 $g_{fus}(E, b)$ 与入射能量和碰撞参数紧密相关. 在一定入射能量下, $g_{fus}(E, b)$ 基本上随着碰撞参数的增大而减小. 这是因为随着碰撞参数的增大, 核力的作用程度逐渐减小, 反应类型从熔合反应向弹性散射逐渐转变.

我们应用 ImQMD 模型并基于 IQ1 这套参数[6] 计算了 $^{40}\text{Ca} + ^{48}\text{Ti}$ [7], $^{46}\text{Ti} + ^{46}\text{Ti}$ [8], $^{40}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ [9], $^{32,34}\text{S} + ^{89}\text{Y}$ [10] 和 $^{28}\text{Si}, ^{35}\text{Cl} + ^{92}\text{Zr}$ [11] 等 10 个熔合体系的激发函数, 并与实验数据进行了比较, 如图 1 所示. 图中圆圈代表实验数据, 三角是我们的计算结果, 叉线是一维 WKB 的计算结果. 通过比较可以看出, ImQMD 计算得到的熔合反应的激发函数基本上都能相当好地符合实验数据. 在

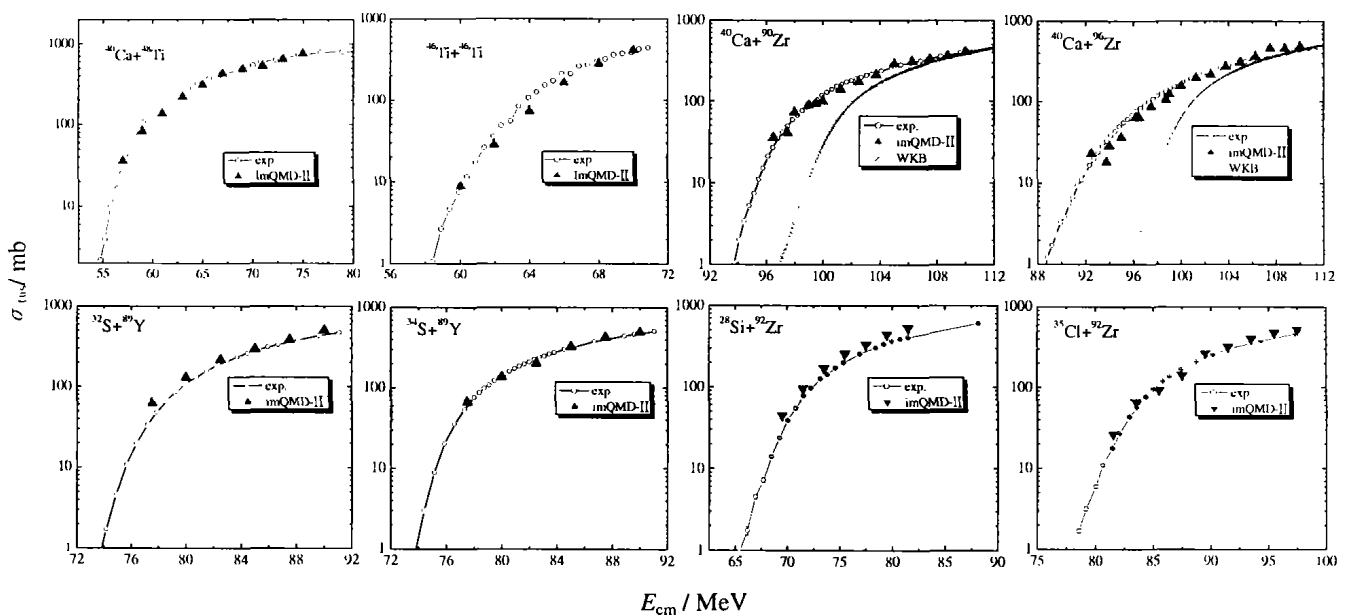


图 1 $^{40}\text{Ca} + ^{48}\text{Ti}$ [7] $^{46}\text{Ti} + ^{46}\text{Ti}$, $^{40}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$, $^{32,34}\text{S} + ^{89}\text{Y}$ 和 $^{28}\text{Si}, ^{35}\text{Cl} + ^{92}\text{Zr}$ 熔合体系的激发函数

这些反应体系中, 我们所采用的参数完全相同, 没有任何额外的可调参数, 再考虑到模型的简单性, 这个结果是令人非常满意的. 而且还可看到, 对于

丰中子熔合体系 $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ 以及 $^{34}\text{S} + ^{89}\text{Y}$, 在没有加入任何新参数的情况下, ImQMD 也能给出相当满意的结果. 这说明 ImQMD 对于丰中子熔合反应

中的同位旋效应的描述是比较成功的.

为了进一步检验 ImQMD 模型对于丰中子核融合反应的描述, 我们计算了最新的(2003 年)丰中子弹核与丰中子靶核的融合反应 $^{132}\text{Sn}+^{64}\text{Ni}$ 的融合激发函数. 图 2 给出了 ImQMD 模型计算的 $^{132}\text{Sn}+^{64}\text{Ni}$ 融合激发函数与最新的实验结果 $^{[12]}$ 以及耦合道理论计算结果的比较. 由于实验上对这一丰中子融合体系的复合核裂变测量存在困难, 在 $E_{\text{cm}} \leq 160$ MeV 能区裂变可以忽略, 因此实验上认为 $E_{\text{cm}} \leq 160$ MeV 能区的蒸发残余截面为融合截面 $^{[12]}$. 其

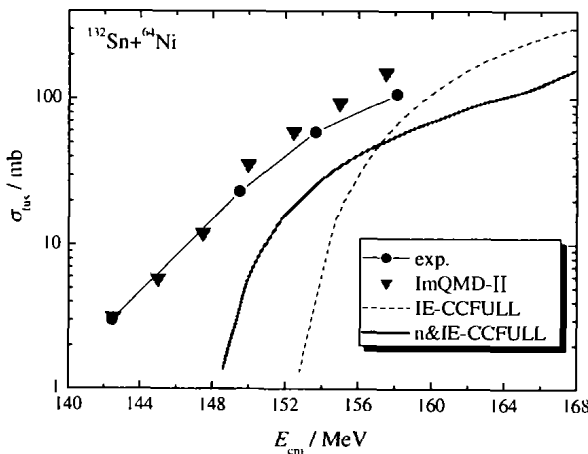


图 2 $^{132}\text{Sn}+^{64}\text{Ni}$ 融合激发函数

中耦合道计算是运用 CCFULL 程序 $^{[2]}$, 考虑了各

阶非线性耦合效应、弹核与靶核的非弹性激发耦合效应(虚线表示)以及中子转移效应(实线表示)得到的结果 $^{[12]}$. 从图 2 看出, 耦合道理论的计算结果在垒下要比实验数据低一、二个数量级, 而 ImQMD 模型的计算结果则与实验数据符合得非常好. 这是因为耦合道理论难以将所有自由度的耦合考虑得非常全面, 而 ImQMD 模型是一种自治的微观动力学模型, 它能将各种表面振动以及核子转移等动力学效应、同位旋效应以及质量不对称效应等比较全面自治地考虑进去, 因此它在描述重离子融合时不需要对某些特殊的动力学效应做额外的考虑, 这也是与耦合道理论计算融合截面的较大差别.

3 重核融合的初步探索

运用 ImQMD 模型我们初步探索了一些重核融合的动力学机制. 首先探索了入射能量对重的融合体系 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 融合过程的影响. 图 3 给出了 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 在 $E_{\text{cm}} = 700$ MeV, $b = 1$ fm 时, 一个典型事件的核子密度的时间演化情况. 从图中可以看出, 非常重的融合体系与轻的融合体系最大的差别就是, 轻的融合体系当两核接触上并且克服库仑位垒后主要走向融合, 而重的融合体系即使两核接触上并且克服库仑位垒后, 很大程度上并不能走向

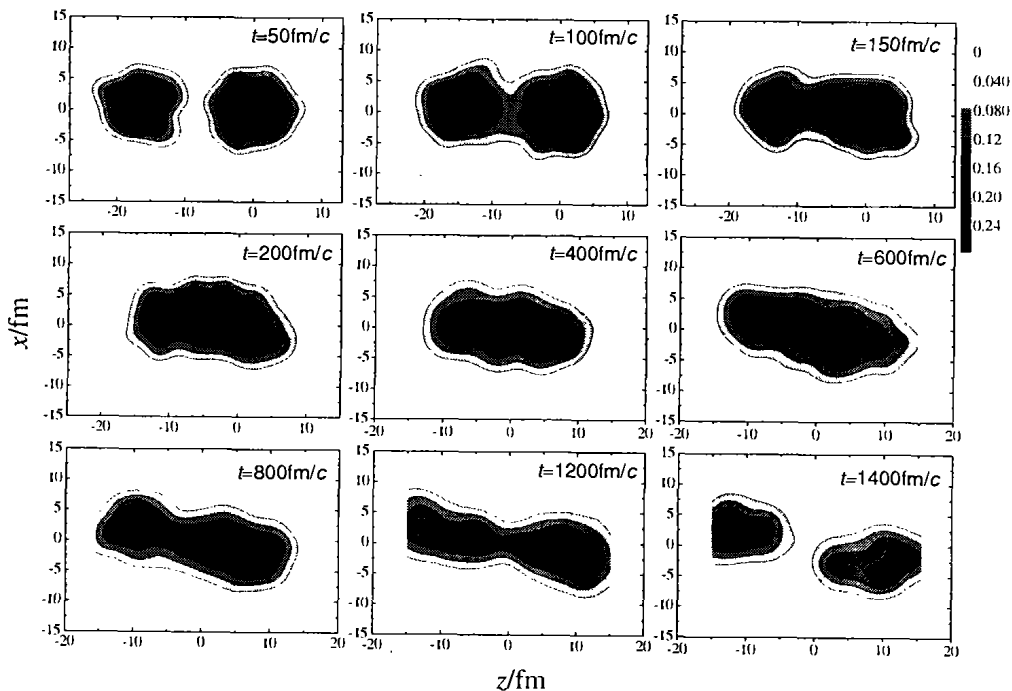


图 3 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 在 $E_{\text{cm}} = 700$ MeV, $b = 1$ fm 时核子密度随时间的演化

熔合(库仑排斥太强), 而是发生准裂变或者裂变. 在图 3 给出的人射能量(高出库仑位垒约 100)下, 弹靶之间的颈部很快形成, 但是由于强大的库仑排斥作用, 复合体系一直保持椭球形, 很难向球形演变. 随后这种复合体系就逐渐走向分裂. 定义从形成复合体系到复合体系分裂的持续时间为复合体的寿命 τ . 由图 3 看出, 在 $E_{cm} = 700$ MeV 时, $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 所形成的复合体的寿命为 1 000 多 fm/c.

图 4 给出了 Au+Au 反应中复合体系的寿命随入射能量的变化. 可以看出, Au+Au 的复合体系的寿命随着入射能量先是逐渐增大, 随后又逐渐降低. 这是因为入射能量较低时弹靶所形成的颈部较小, 体系容易分裂; 随着能量的逐渐增大, 弹靶可以靠得更近一些, 能够交换更多的粒子, 体系更靠近球形, 最小方均根半径 $\langle R_{min}^2 \rangle^{1/2}$ 较小, 这样体系相对较难以分裂, 体系的寿命也相应增大; 当能量进一步增大时, 复合体系的激发能明显增大, 朝多重碎裂的方向改变, 体系的寿命也逐渐减小.

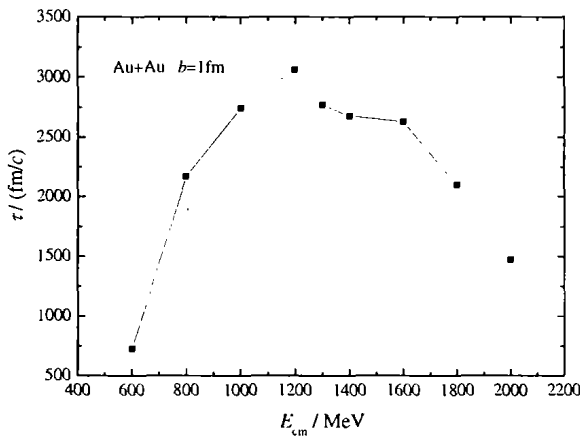


图 4 Au+Au 反应中复合体系的寿命随入射能量的变化

我们还研究了复合体系的寿命与体系大小的依赖关系. 表 1 给出了 4 个不同的弹靶对称的熔合体

表 1 4 个不同的弹靶质量对称体系的复合体系寿命

Reactions	E_{cm} /MeV	τ / (fm · c ⁻¹)
$^{232}\text{Th} + ^{232}\text{Th}$	800	975
$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$	700	1 678
$^{162}\text{Er} + ^{162}\text{Er}$	600	>5 660
$^{162}\text{Er} + ^{232}\text{Th}$	700	1 650

系所形成的复合体的寿命. 从表中可以看出, 较重的熔合体系所形成的复合体系的寿命会相对越短, 而较轻的熔合体系所形成的复合体系的寿命则大大增长, 这与双中心壳模型得到的从轻到重一系列双核系统的寿命的趋势是完全一致. 而且我们还注意到形成相同复合体系 ($A = 394, Z = 158$) 的 $^{162}\text{Er} + ^{232}\text{Th}$ 与 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 反应, 在相同的人射能量下, 两者所形成的复合体系的寿命基本相同. 这说明了复合体系分裂过程可能部分忘记历史.

另外, 我们还研究了复合体系的中子质子比对复合体系寿命的影响. 我们比较了 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$, $^{186}\text{W} + ^{208}\text{Pb}$ 以及 $^{186}\text{Hf} + ^{208}\text{Pb}$ 3 个体系在相同的人射能量 $E_{cm} = 700$ MeV 以及碰撞参数 $b = 1$ fm 下复合体系的寿命, 见表 2. 这 3 个体系所形成的复合体系的质量数相同 ($A = 394$), 质子数逐渐减少. 从表中可以看出, 这 3 个复合体系随着体系的 N/Z 值逐渐增大, 所形成的复合体系越接近球形(方均根半径越小), 复合体系的寿命也逐渐增大.

表 2 $E_{cm} = 700$ MeV 碰撞参数 $b = 1$ fm 时复合体系的寿命

Reactions	N/Z	$\langle R_{min}^2 \rangle^{1/2}$ / fm	τ / (fm · c ⁻¹)
$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$	1.493 67	7.22	1 678
$^{186}\text{W} + ^{208}\text{Pb}$	1.525 64	7.05	1 996
$^{186}\text{Hf} + ^{208}\text{Pb}$	1.558 44	6.99	2 660

4 总结

我们发展了 ImQMD, 并运用该模型对近垒熔合反应的动力学机制进行了研究. 应用 ImQMD 模型计算了 $^{40}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ 和 $^{32,34}\text{S} + ^{89}\text{Y}$ 等 10 多个熔合体系的激发函数(包括非常丰中子的熔合体系 $^{132}\text{Sn} + ^{64}\text{Ni}$), 其结果基本上都能相当好地再现实验数据. 在此想强调的是, ImQMD 模型能将熔合反应中的动力学效应、同位旋效应以及弹靶质量不对称效应等比较全面、自治地考虑进来, 从而给熔合反应的研究提供了一条新的途径. 此外, 我们应用 ImQMD 模型对重核熔合过程进行了初步的探索. 发现复合体系的寿命与体系的人射能量、体系大小以及体系的中子质子比有着明显的依赖关系.

参 考 文 献:

- [1] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **83**: 3 154.
- [2] Hagino K, Rowley N, Kruppa A T. Comp Phys Comm, 1999, **123**: 143.
- [3] Adamjan G G, Antonenko N V, Sheid W, *et al.* Nucl Phys, 1997, **A627**: 361.
- [4] Shen Caiwan, Kosenko Grigori, Abe Yasuhisa. Phys Rev, 2002, **C66**: 061602.
- [5] Wang Ning, Li Zhuxia, Wu Xizhen. Phys Rev, 2002, **C65**: 064608.
- [6] Wang Ning, Li Zhuxia, Wu Xizhen, *et al.* Phys Rev, 2004, **C69**: 034608.
- [7] Bierman J D, Chan P, Kelly M P, *et al.* Phys Lab Ann Rep, Univ of Washington, 1995, 19.
- [8] Stefanini A M, Corradi L. LNL Annual Report, 2000, 42.
- [9] Timmers H, Ackermann D, Beghini S, *et al.* Nucl Phys, 1998, **A633**: 421.
- [10] Hukherjee A, Dasgupta M, Hinde D J, *et al.* Phys Rev, 2002, **C66**: 034607.
- [11] Newton J O, Morton C R, Dasgupta M, *et al.* Phys Rev, 2001, **C64**: 064608.
- [12] Liang J F, Shapira D, Gross D J, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **91**: 152701.

Development of Quantum Molecular Dynamics Model and Its Application to Heavy-ion Reactions near Barrier*

WANG Ning², LI Zhu-xia^{3,1,2}, WU Xi-zhen³

(1 Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;

2 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3 China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: We have developed a new microscopic dynamical model called improved quantum molecular dynamical model (ImQMD). This model can describe the fusion process at energies near the Coulomb barrier as well as the multifragmentation process at intermediate energies in heavy-ion collision (HIC) uniformly. By using this model, fusion cross sections (including some of neutron-rich nuclei reactions and that of newly measured $^{132}\text{Sn} + ^{64}\text{Ni}$ fusion reaction) of tens reactions can be reproduced remarkably well. In fusion reaction, the dynamical effects, isospin effects and mass asymmetry effects etc. can be treated comprehensively and self-consistently in this model, which offers a new way to study fusion reaction and to explore the mechanism of synthesis of superheavy elements hopefully. In addition, the quasi-fission process in heavy nuclei fusion are studied preliminarily by this model. The dependence of lifetime of composite system on the incident energy, system size, and N/Z ratio of composite system are found.

Key words: improved quantum molecular dynamical model; neutron-rich nuclei; massive nuclei; fusion cross section; lifetime of composite system

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10347142, 19975073, 10175093, 10175089); China Postdoctoral Science Foundation