

文章编号: 1007-4627(2004)03-0192-05

非束缚核 ${}^9\text{He}$ 的实验研究*

王宏伟

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 简要介绍了目前有关非稳定核 ${}^9\text{He}$ 的实验和理论研究现状. 现代壳模型理论计算表明 ${}^9\text{He}$ 的基态自旋宇称为 $1/2^+$, 而不是 $1/2^-$, 即存在自旋宇称翻转现象. 到目前为止, 实验上虽然观测到了 ${}^9\text{He}$ 的几个共振态, 但还不能确认其基态的能量和自旋宇称值. 利用新的实验技术——逆运动学弹性共振散射, 对 ${}^9\text{He}$ 核进行研究, 给出了共振态的自旋宇称可能的取值范围. 在 ISOL 型次级束装置上的实验有望能给出 ${}^9\text{He}$ 核能级的精确测量.

关键词: 放射性束流; 非束缚核; 核结构

中图分类号: O571.2; O571.41+2 **文献标识码:** A

1 引言

对极端条件下的核结构的研究是检验现有核结构模型的一种有效的工具, 大角动量核态和极端粒子、能量密度下的重离子碰撞是众所周知的两个例子. 20 世纪 80 年代以来, 放射性束流装置的相继建成和投入运行, 使远离稳定线核素的结构性质研究成为可能, 从而为检验和拓展核结构模型提供了新的途径. 当前原子核结构研究的主要发展方向之一就是晕核和不稳定核的结构、性质、衰变和核反应动力学的研究. 轻核可以在一个相对自由的模型空间进行理论计算, 对这些轻奇异核的深入研究, 将会揭示出一些核物理基本问题的本质, 如多体力的存在、检验有效相互作用的范围等. 对滴线附近的不稳定核素的实验测量, 对于理解晕核的结构具有重要的作用. 目前的研究揭示出了它们具有异常的核结构性质, 如中子晕核、双质子衰变和能级翻转等. He 同位素的研究为这一目的提供了绝好的机会. 我们知道 ${}^4, {}^6, {}^8\text{He}$ 是束缚的, 而 ${}^5, {}^7, {}^9\text{He}$ 是非束缚的, 因此系统地研究 He 同位素的结构性质, 特别是 ${}^9\text{He}$ 和 ${}^{10}\text{He}$ 非束缚核结构的研究, 对于研究 Borromean 核的结构、波函数以及核谱学的系统测量等都具有重要的作用, 可以使我们对这些中子滴线附近核素的结构性质有进一步的了解^[1, 2].

2 ${}^9\text{He}$ 核的实验和理论研究现状

1987 年, 实验上第一次观测到 ${}^9\text{He}$ 的共振态(相对于 ${}^8\text{He}+p$ 阈分别为 1.13, 2.33, 4.93 和 8.13 MeV)^[3]. 1988 年, Bohlen 等^[4]在 ${}^9\text{Be}$ (${}^{13}\text{C}$, ${}^{13}\text{O}$) ${}^9\text{He}$ 反应中也看到了 ${}^9\text{He}$ 的共振态(1.2, 4.0 MeV), 同壳模型理论计算比较后, 他们认为 1.2 MeV 的共振态就是 ${}^9\text{He}$ 的基态, 自旋宇称为 $1/2^-$. 由于当时壳模型所使用的两体矩阵元均来自于对稳定核能级能量的拟合, 因此所有的壳模型计算结果均给出了 ${}^9\text{He}$ 的基态为 $1/2^-$ ^[5, 6]. 1992 年, Warburton 和 Brown^[7]利用现代壳模型(WBP 和 WBT 相互作用)计算给出的 ${}^9\text{He}$ 基态为 $1/2^+$, 第一激发态为 $1/2^-$, 第一次给出了 ${}^9\text{He}$ 可能存在基态能级翻转的预言. 1995 年, Oertzen 等^[8]在 ${}^9\text{Be}$ (${}^{14}\text{C}$, ${}^{14}\text{O}$) ${}^9\text{He}$ 反应中观测到了 5 个共振态(相对于 ${}^8\text{He}+p$ 阈值为 1.27, 2.42, 4.40, 5.25 和 9.17 MeV), 并认为基态的自旋宇称为 $1/2^-$, 第一激发态为 $1/2^+$, 但也不排除是 $1/2^-$ 的可能. 因此, 1995 年 Aoglobin^[9]提出在 ${}^9\text{He}$ 系统中不存在能级翻转现象. 1998 年, Navratil 等^[10]用大基壳模型(large-base no core shell model)计算 p 壳核后, 给出的 ${}^9\text{He}$ 基态也为 $1/2^-$. 另一方面, 人们也在设想, 或

收稿日期: 2004-02-24; 修改日期: 2004-03-30

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175081, 10205020); 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KYCX2-SW-No4); 中国科学院百人计划基金资助项目

作者简介: 王宏伟(1971-), 男(蒙古族), 内蒙古赤峰人, 助研, 博士, 从事放射性束物理和核天体物理实验研究.

许 $l=0$ 态没有共振结构, 由于难以测量而被以前的实验错过了. 对¹⁰Li 的计算和测量提示实验物理学家采用对 s 态非常灵敏的实验技术研究非束缚系统, 即符合测量轻靶反应中的碎片和反应中出射的中子, 探测感兴趣的系统末态相互作用^[11]. 利用这种实验技术, 2001 年 Chen 等^[12] 在⁹Be(¹¹Be, ⁸He + n)X 反应中观测到了⁹He 的 s 波散射长度 $a_s = -10$ fm, 能量为 0.0—0.2 MeV 的虚态 ($E = -\hbar^2/2\mu a_s^2$, μ 为约化质量). 他们认定这就是理论预言的⁹He 基态, 自旋宇称为 $1/2^+$, 并认为以前实验观测到的窄共振能级(相对⁸He+p 阈值能量为 1.2 MeV)应该是⁹He 的第一激发态, 其自旋宇称应为 $1/2^-$ (如图 1 所示, 其中 WBP 和 WBT 为文献[7]的壳模型计算结果, LC 为 Chen 等人的实验测量结果, KKS 和 WVO 分别为文献[3]和[8]的实验测量结果). 随后 Takaharu Otsuka 等^[13] 用 Monte Carlo 壳模型计算后也给出了⁹He 的基态为 $1/2^+$, 第一激发态为 $1/2^-$, 并做出了远离稳定线核素 $N=8$ 幻数消失的预言.

叉的原因解释为中子-质子单极相互作用, 以及四极形变和对阻塞效应等的贡献^[2].

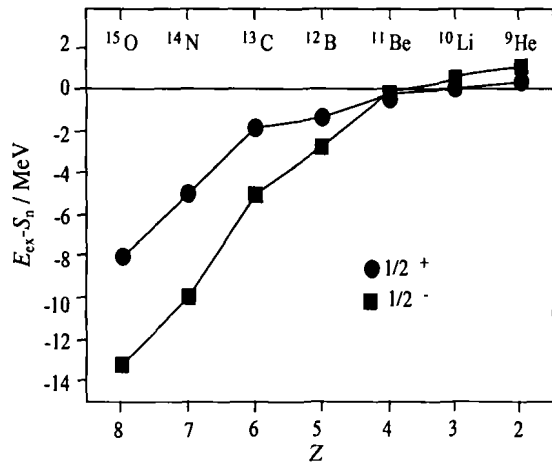


图 2 $N=7$ 核素的 $1/2^+$ 和 $1/2^-$ 态与中子分离能之差^[2]

显然, 我们需要一种新的实验方法来确定滴线附近非稳定核共振态的自旋宇称, 以获得独立于理论预言的核结构信息, 揭示出奇异性核可能的新特征.

3 逆运动学弹性共振散射实验对⁹He 共振态的研究

1993 年, V Z Goldberg 等人提出了利用放射性束的逆运动学弹性共振散射实验来研究非束缚态核的实验技术. 这一新的实验方法在¹⁰C+p 反应中被首次应用, 观测到了非束缚态核¹¹N 的共振态, 确认了¹¹N 基态自旋宇称翻转现象^[14]. 此后在各地的放射性核束流装置上相继开展了厚靶逆运动学的弹性共振散射实验工作. 1998 年, V Z Goldberg 建议利用逆运动学的弹性共振散射实验研究丰中子核的同位旋相似态, 即通过⁸He+p 散射布居到⁹Li 的同位旋为 $T=5/2$ 的高激发态上, 测量结果直接同⁹He 激发态的数据相联系. 下面简要介绍在法国 GANIL 实验室和俄罗斯 Dubna 实验室开展的⁸He + p → ⁹Li 弹性共振散射实验情况. 他们利用⁹Li 的同位旋相似态 ($T=5/2$) 来研究⁹He 的基态和激发态的共振能量、自旋宇称和衰变分宽度等. 对应的部分能级纲图如图 3 所示.

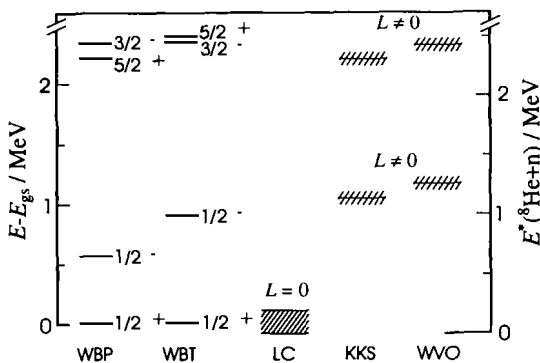


图 1 理论和实验得到的⁹He 部分能级^[13]

详细说明见正文.

可以看出, 到 2001 年为止, 利用转移反应, 实验上已经观测到⁹He 的一些非常窄的激发态和接近中子发射阈值的基态存在的证据, 但是其自旋和宇称还没有确定, 甚至基态是否存在自旋宇称翻转现象也没有定论, 而给出的虚态结合能值似乎太大了, 同¹⁰He 的非稳定性不一致. 现代壳模型理论计算表明, ⁹He 的基态的自旋宇称应该为 $1/2^+$, 而不是经典壳模型预言的 $1/2^-$, 即同众所周知的¹¹Be 的基态自旋翻转一样, ⁹He 和¹⁰Li 也可能同样具有自旋翻转现象(见图 2). 通常, 将造成这种能级交

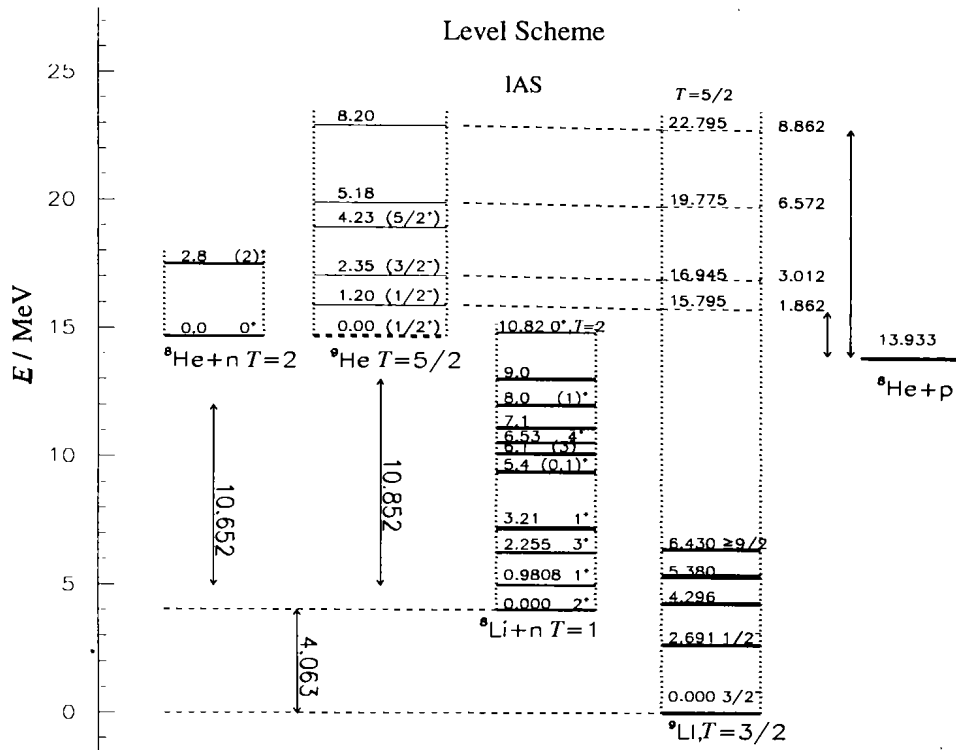


图 3 ${}^9\text{He}$ 的部分能级纲图及其对应的同位旋相似态

3.1 Dubna 实验测量结果

2002 年, Rogachev 等^[15]在俄罗斯 Dubna 实验室完成了 ${}^8\text{He}+p(\text{CH}_4 \text{ 气体靶})$ 共振弹性散射实验,

他们仅测量了实验室系 0° (对应质心系 180°) 的激发函数, 并给出了 R 矩阵拟合的结果如表 1 所示, $\Delta E-E$ 散点图和激发函数如图 4 和图 5 所示.

表 1 R 矩阵拟合的 ${}^9\text{Li}(T=5/2)$ 态共振参数*

N	J^*	$E^*({}^9\text{Li})/\text{MeV}$	$E^*({}^9\text{He})/\text{MeV}$	$\Gamma_{\text{total}}/\text{keV}$
1	$1/2^-(3/2^-)$	16.0 ± 0.1	1.1	<100
2	$3/2^-(1/2^-)$	17.1 ± 0.2	2.2	800 ± 300
	$1/2^+$	17.3 ± 0.25	1	100 ± 400
3	$5/2^+(3/2^+)$	18.9 ± 0.1	4.0	240 ± 100

* 括号中为这一共振态的几种可能的自旋宇称值.

由于同位旋守恒而只有两个衰变道开放, 即 ${}^8\text{He}+p$ 和 ${}^8\text{Li}(T=2)+n$, 因此 ${}^9\text{Li}$ 的 $T=5/2$ 态的波函数可以通过有争议的单粒子构型表达为

$$\Psi_{{}^9\text{Li}(T=5/2)} = \frac{1}{\sqrt{5}}\Psi_{{}^8\text{He}+p} + \frac{2}{\sqrt{5}}\Psi_{{}^8\text{Li}(T=2)+n},$$

因为核芯 ${}^8\text{He}$ 的自旋为 0, 因此忽略了公式中的自旋 Clebsh-Gordan 系数. 同时他们用这个公式来估算 $T=5/2$ 态的质子和中子的衰变分宽度 (即认为中子衰变的分宽度为质子衰变的分宽度的 4 倍) 以

及 ${}^9\text{Li}$ 的共振态的位置. 从最后的实验结果来看, 他们第一次测量到了 ${}^9\text{Li}$ 的 $T=5/2$ 的激发态分别为 16.0, 17.2 和 18.9 MeV, 即 ${}^9\text{He}$ 的同位旋相似态, 并给出了可能的自旋取值范围. 从最新的壳模型计算来看, 这些共振态应该是 ${}^9\text{He}$ 的激发态, 基态的位置应该在 14 MeV 或者更低的能量处, 已经低于探测器的探测阈. R 矩阵分析也不排除有低能 s 态存在的可能 (理论计算显示这个 s 态没有共振结构, 那么 R 矩阵对这一能级的拟合可能是不合适的). 进一步精确的实验需要降低 ${}^8\text{He}$ 束流的能量

和提高探测器的能量分辨. 显然利用经磁分析的束流进行更精确的实验是非常困难的, 精确的实验结果应该可以在 ISOL 型的次级束流线上获得.

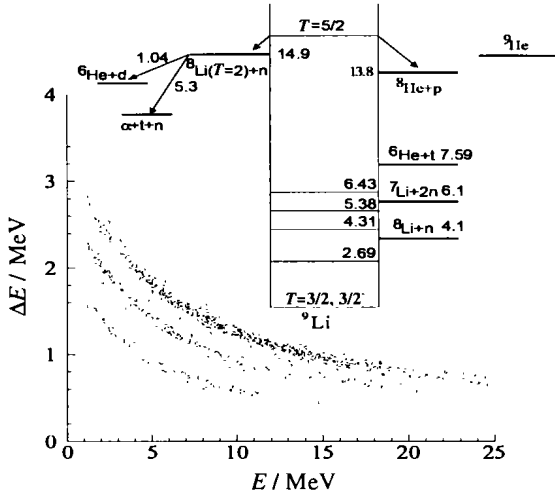


图 4 ΔE - E 散点图及⁹Li($T=5/2$)的两个出射道示意图^[15]

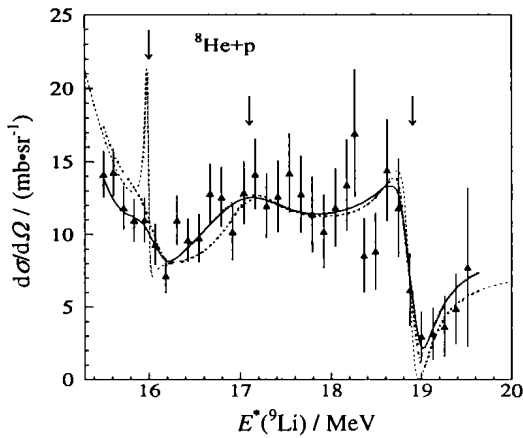


图 5 ⁸He+p 共振弹性散射实验的激发函数谱
 ...为 R 矩阵集合结果, —为 R 矩阵拟合结果与实验的分辨函数的卷积, →表示共振态的位置^[15].

3.2 GANIL 实验测量结果

2002 年 7 月, 法国 GANIL 也进行了⁸He+p 的逆运动学弹性共振散射实验. 实验是在 GANIL 的 SPEG 谱仪上进行的, ⁸He 次级束流由 SPIRAL (ISOL 型) 产生, 能量为 3.9 MeV/u, 测试束流为 ¹³C, 能量为 11.9 MeV/u. 探测器为 MAYA 活性靶探测器, 是由 GANIL 的 Physical Group 研制的一种新型电荷投影室 CPC, 内充气体为异丁烷 C₄H₁₀, 气压为 1 080 mbar^[16]. MAYA 探测器能提供粒子径迹的三维信号, 从而得到带电粒子穿过探测器灵敏区域时的径迹(射程)、反应发生的地点和

反应平面等. 最后由射程-电荷散点图得到粒子分辨, 并由射程反推出粒子能量.

理论上来说, 这种活性靶探测器可以进行 4π 角度的测量, 实际上由于探测器尺寸和电子学的限制, 能够探测的角度为 0°—45°, 对应质心系的角度为 180°—90°. 因此相对于 Dubna 的实验来说, 可以有多个角度激发函数的测量结果. 由于这是 MAYA 探测器的首次实验, 数据分析很复杂, 最后的数据处理还没有完成, 因此只给出了 100° 和 120° 的初步实验结果(见图 6). 从图中可以看出, 共振能量和自旋宇称分别为 $E_r=2.2$ MeV, $1/2^+$ 和 $E_r=3.4$ MeV, $3/2^-$ 的拟合结果与实验数据符合得较好. 如果这一实验结果是正确的话, 那么这里有两个问题: 其一, 如果末态相互作用的结果^[12]是正确的, 则这两个共振态应该对应⁹He 核的激发态, 按照理论计算的结果, 能级的顺序应该是 $1/2^-$ 和 $3/2^-$ ($5/2^+$); 其二, 如果转移反应的实验结果是正确的, 即⁹He 核的基态在中子阈值以上 1.2 MeV 处, 那么共振态就对应⁹He 的基态和激发态, 能级的顺序应该是 $1/2^+$ 和 $1/2^-$. 两种情况都同实验结果不一致, 因此 GANIL 实验组除了进一步的数据分析外, 还计划再次进行这一反应的实验测量, 以提高实验精度和降低探测阈值.

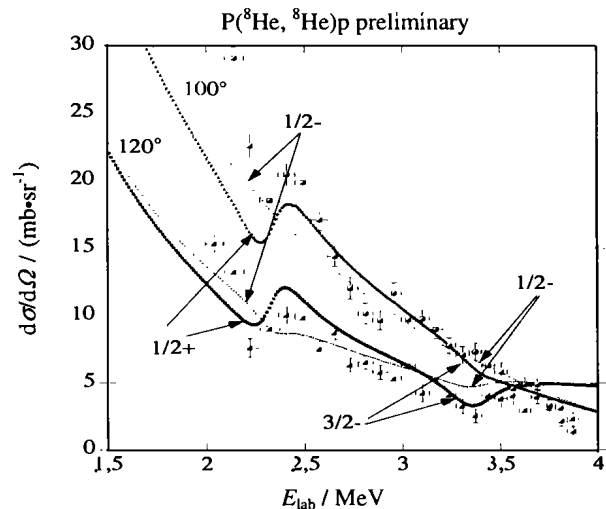


图 6 GANIL 实验的初步结果

4 总结

现代壳模型理论计算给出的⁹He 核基态和第一激发态的自旋宇称存在翻转现象, 同时计算给出的

基态能量(相对于中子发射阈)是非常低的,而且没有共振结构,因此实验上是非常难测量的.早期的转移反应观测到了 ${}^9\text{He}$ 核的几个共振态,但是在确定 ${}^9\text{He}$ 的基态位置和自旋宇称上,不同的实验给出的结果并不一致.逆运动学的弹性共振散射实验采

用了同位旋相似态(IAS)来对应 ${}^9\text{He}$ 的能级,进一步的精确测量有望给出 ${}^9\text{He}$ 的能级结构最新的实验结果,以确认 ${}^9\text{He}$ 核的基态能量、自旋宇称以及是否存在基态能级翻转现象.

参 考 文 献:

- [1] Hansen P G, Sherrill B M. Nucl Phys, 2001, **A693**: 133 and reference there in.
- [2] Jonson Bjorn. Physics Report, 2004, 389.
- [3] Seth K K, Artuso M, Barlow D, *et al.* Phys Rev Lett, 1987, 1 930.
- [4] Bohlen H G, Gebauer B, Kolbert D, *et al.* Z Phys, 1988, **A330**: 227.
- [5] Van Hees A G M, Glaudemans P W M. Z Phys, 1984, **A315**: 223.
- [6] Poppelier N A F M, Wood L D, Glaudemans P W M. Phys Lett, 1985, **B157**: 120.
- [7] Warburton E K, Brown B A. Phys Rev, 1992, **C46**: 923.
- [8] Von Oertzen W, Bohlen H G, Gebauer B, *et al.* Nucl Phys, 1995, **A588**: 129c.
- [9] Ogloblin A A. Z Phys, 1995, **A351**: 355.
- [10] Navratil P, Barrett B R. Phys Rev, 1998, **C57**: 3 119.
- [11] Thoennessen M, Yokoyama S, Azhari A, *et al.* Phys Rev, 1999, **C59**: 111.
- [12] Chen L, Blank B, Brown B A, *et al.* Phys Lett, 2001, **B505**: 21.
- [13] Takaharu Otsuka, Rintaro Fujimoto, Yutaka Utsuno, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **87**: 082502-1.
- [14] Markenroth K, Axelsson L, Baxter S, *et al.* Phys Rev, 2000, **C62**: 034308-1.
- [15] Rogachev G V, Goldberg V Z, Kolata J J, *et al.* Phys Rev, 2003, **C67**: 041603-1.
- [16] Mittag W, Savajols H, Demonchy C E, *et al.* Nucl Phys, 2003, **A722**: 10c.

Experimental Investigation of Unbound Nuclei ${}^9\text{He}$ *

WANG Hong-wei

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The status of theoretical and experimental investigations on unbound nucleus ${}^9\text{He}$ is briefly introduced. The results of modern shell model suggest that the ground state of ${}^9\text{He}$ should be $1/2^+$ instead of $1/2^-$ as expected by the normal shell ordering. Therefore, it means that the parity inversion which was well known in ${}^{11}\text{Be}$ occurs also in ${}^9\text{He}$ ground state. Recently, some resonance states were observed in transfer reactions and final-state reaction, but their spin-parities cannot be exactly determined and the ground-state cannot be uniquely identified. New technique, which is elastic resonance scattering in inverse kinematics, has been used in recent experiments with radioactive ion beam. We expect that the new results on ${}^9\text{He}$ energy levels will be obtained in ISOL type second-beam line experiments.

Key words: radioactive nuclear beam; unbound nucleus; nuclear structure

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10175081, 10205020); Major state Basic Research Development program of China(G2000077401); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Science (KJCX2-SW-No4); One Hundred Talents Projects of Chinese Academy of Science