

第一代恒星的观测和研究进展

陆 烨^{1,2} 赵 刚¹ 梁艳春¹

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2 中国科学院 - 北京大学联合北京天体物理中心 北京 100871)

摘 要

第一代恒星(星族 III 恒星)标志着宇宙从暗物质时代到现在已知的宇宙的转折点。目前对第一代恒星(星族 III 恒星)的观测结果表明,在银河系中还没有发现零金属丰度的恒星,金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ 的恒星极少。由于近几年的 BPS 巡天,银河系中已知的极端贫金属丰度的恒星数目大大增多。目前,可探测到的极端贫金属星的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 最低约为 -4.1 。金属丰度在 -4 到 -3 之间的恒星大约有 100 多颗,这些恒星的运动学特性非常类似于其它晕星。然而还没有发现第一代恒星,或金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -5$ 的恒星。关于第一代恒星的形成过程、初始质量函数以及存在于银河系的什么地方,都还没有任何直接的证据。但第一代恒星确实存在。第一代恒星这个谜一般的实体,向观测和理论天文学家提出了巨大挑战。为探测和预言银河系中的第一代恒星,天文学家提出了许多观测方案和理论模型。对有关第一代恒星在观测和理论研究上的进展进行了综述。

关键词 恒星; 星族 III— 恒星; 丰度 — 星系; 运动学和动力学

分类号 P144

1 前 言

第一代恒星,即星族 III 恒星。天文学家根据第一代恒星在宇宙早期形成的可能图像,提出了至少 4 种关于星族 III 恒星的定义^[1]。本文所讨论的第一代恒星是指可探测的第一代恒星:它是目前还未演化的(例如寿命 $\tau_{\text{ms}} \geq 14\text{Gyr}$ 的恒星)、具有原初气体化学成分的、银河系中诞生的第一代恒星成员;或者零金属丰度的第一代恒星是指金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -6$ 的恒星^[1]。虽然我们还未找到我们所定义的第一代恒星,但对其探测和研究有着十分重要的意义。首先第一代恒星研究为星系的早期演化^[2]、大质量黑洞的形成^[3]和原始气体星云的演化提供了丰富的信息^[4,5]。另外通过对第一代恒星的分光 and 测光观测资料的分析,能提取出许多与之相关的重要信息^[1],主要包括:(1)对银河系晕

的金属丰度分布函数 (*MDF*) 的特性给出了限定条件, 即 *MDF* 的下限是多少? (2) 为测量第二代恒星的重金属元素丰度、原初 Li 丰度、早期银河系宇宙射线的辐射以及测量早期 II 型超新星爆发的元素产率和揭示其质量分布等提供直接的线索; (3) 为产生 r- 过程和 s- 过程所需的天体物理场所提供证认; (4) 为早期银河系混合过程的效率、第一代 AGB 恒星的核合成结果提供证据; (5) 利用轻和重元素作为天文测定时间的标准, 估算出银河系和宇宙年龄的最小极限; 证明银河系中厚盘的存在及厚盘的金属丰度分布在低金属丰度具有延伸的特性; (6) 提供测量银河系中晕和厚盘的速度椭圆及它们随银河系中心距离的变化的工具; (7) 为检验具有逆向旋转特性的高层银晕、银河系已经发生的和正在发生的与其较小的伴星系并合所产生的亚结构提供运动学上的限制等。综上所述, 第一代恒星被期望携带着研究星系演化时早期阶段中宇宙物理条件的信息。由于第一代恒星形成于没有碳和重元素的原初气体中, 因此是最古老的亮物质^[6]。目前, 这些活着的、尚未演化的星族 III 恒星, 如果能被探测到, 将是揭示星系化学和动力学演化的唯一证据。自宇宙微波背景辐射发现以来^[7], 关于宇宙起源的热大爆炸理论被普遍接受^[8]。热大爆炸模型中的元素核合成计算表明^[9~11], 宇宙中原始物质由氢、氦、氦和极少量的锂元素组成。恒星光谱 MK 分类^[12]的一个基本假设是所有恒星的化学成分与太阳的化学成分相同。然而, 1951 年 Chamberlain 和 Aller^[13]发现了 HD19445 和 HD140283 两颗星的化学成分与太阳不同, 特别是它们的金属丰度 $[Fe/He]$ 比太阳低很多。Burbidge 等人的论文发表以后, 恒星具有与太阳相同化学成分的观点被质疑。假设宇宙中除氢、氦、氦和锂之外的其它化学元素由超新星爆发产生, 简单星系化学演化模型预言大约 10% 的低质量恒星的金属丰度是现在形成的恒星的金属丰度的 1/10。然而, 简单星系化学演化模型中预言了过多的贫金属恒星, 其比例与太阳邻近的观测结果相矛盾, 这就是所谓的“G 矮星问题”^[15~18]。原始气体星云演化产生与宇宙热大爆炸之后的物质有相同化学组成的第一代恒星是必然的。然而, 目前仍没有直接的观测证据表明第一代恒星的存在。第一代恒星是什么时候形成的? 形成第一代恒星的初始质量函数是什么? 这些仍是十分有争论的问题。

2 第一代恒星的观测研究

2.1 样本的选取

在寻找第一代恒星之前, 人们首先应该确定恒星的年龄, 挑选出最古老恒星作为探测第一代恒星的观测对象。然而, 单个恒星的距离不确定会导致对其年龄估算的不精确。即使已知色指数 $b-y$, m_1 , c_1 和 β , 理论上可由此给出恒星的绝对星等, 但仍不能精确辨别年龄在 14Gyr 到 16Gyr 之间的恒星, 因此对第一代恒星的巡天并不以恒星的年龄作为挑选观测目标的判据。由于第一代恒星的金属丰度为零或极贫 ($[Fe/H] < -6$), 所以寻找第一代恒星观测目标的判据^[19]是: 恒星的金属丰度是否为零或极贫。目前贫金属恒星的观测样本分成两类: (1) 高自行运动的恒星样本。因为在太阳邻近的每 1000 颗正常恒星中仅有 1 颗贫金属星 ($[Fe/H] < -0.5$), 而对高自行运动恒星样本进行搜寻, 发现贫金属星的可能性会增加几百倍。到目前为止, 对高自行运动恒星样本进行观测还未发现金

属丰度 $[Fe/H] < -3$ 的贫金属恒星^[20~25]。(2) 非运动学选择的恒星样本^[26]。这些样本由给定视场中分光观测能达到的极限星等的恒星组成。例如目前对还未开始演化恒星的观测表明：分光巡天能达到的极限视星等为 15.5^[27~29]。目前主要有两个研究团组利用分光巡天探测极端贫金属恒星：Bond 巡天^[26,27] 和 BPS 巡天^[29,30]。在 Bond 巡天样本中，仅仅发现了 3 颗恒星的金属丰度 $[Fe/H] \leq -3$ 。明显地，早期银河系中金属丰度的演化有待进一步的观测与研究^[30]。BPS 巡天成功地打破了 Bond 巡天样本中 $[Fe/H] \leq -3$ 的极限。在 BPS 巡天中，金属丰度 $[Fe/H] \leq -3$ 的恒星数目超过了 100 颗，并探测到了金属丰度 $[Fe/H] \approx -4.1$ 的恒星。

2.2 极端贫金属恒星的运动学特性

太阳邻近贫金属恒星的运动学特性已有较好的研究，它与正常恒星的运动学特性完全不同^[31]。极端贫金属恒星 (VMP) 是否具有太阳邻近贫金属星的运动学特性呢？由于太阳邻近极端贫金属星的观测样本非常贫乏，只能用高自行运动恒星的观测资料来决定其局域静止坐标下的三个速度分量 U 、 V 、 W (U 代表指向星系中心的速度分量， V 代表指向星系旋转方向的速度分量， W 代表垂直星系平面的速度分量)。Sandage 等人^[21]，Norris 等人^[32] 和 Carney 等人^[23] 对高自行运动恒星的观测样本进行研究的结果表明：(1) 没有得出高自行运动恒星的金属丰度与其运动学特性之间的明确关系。(2) VMP 的运动学特性与晕星非常类似。(3) 如果 VMP 在银河系中没有逆转，则在其内禀坐标系中完全没有系统旋转。(4) 在距离银河系中心 10kpc 以内，VMP 的速度椭球沿径向扁平，而在大于 20kpc 处，速度椭球趋于球状或沿径向塌缩。

2.3 极端贫金属恒星的年龄

目前，能精确确定年龄的贫金属星是球状星团 (GC) 的成员星，早期理论估算 GC 的年龄值约为 20Gyr^[33]，这是通过比较观测获得的 GC 的颜色-光度关系而得到的。但该结果与宇宙形成的年龄相矛盾。CCD 测光^[34] 和空间观测^[35] 使 GC 的观测取得了重大进展。极端贫金属 GC 年龄通常在 13 ~ 16 Gyr 之间。最近 Mazzitelli 等人^[36] 提出在 GC 中不能排除年龄为 12 Gyr 的恒星。估算最古老恒星年龄的独立方法是测定半衰期为 14 Gyr 的放射性元素钍 (Th) 与另一 r 过程元素的丰度比^[37]。例如通过测定 Th/Eu，可推算出最古老恒星的年龄为 15 ± 3.7 Gyr^[38]。理论预言这一年龄也是极端贫金属恒星的年龄^[39]。

3 第一代恒星的理论研究模型

观测事实表明已经找到了极端贫金属丰度的恒星 (例如 $[Fe/H] = -4.1$ 的恒星)，但令人遗憾的是目前还未能观测到零金属丰度的恒星。也就是说，还不能宣布已经找到了第一代恒星。从宇宙学观点来看，第一代恒星的形成是必然的，为什么观测不到这样的恒星呢？为解释这一现象，天文学家提出了许多理论模型。

模型 1：Doom 等人^[39]1985 年提出如果第一代恒星的形成过程类似于现在星协的形成过程，那么我们已经找到了“真正的第一代恒星”。它们是在大质量 O 型星演化完成并产生 II 型超新星爆发导致周围的星际介质 (以后简称 ISM) 污染之前已经形成的、具有

初始化学元素成分的 G 矮星和 K 矮星。如果这些 G 矮星和 K 矮星就是“真正的第一代恒星”, 那么大致应该有 10 颗。形成这些恒星的初始质量函数具有 Salpeter 的初始质量函数形式, 其质量在 $0.8M_{\odot}$ 和 $0.9M_{\odot}$ 之间。这些恒星是 BPS 巡天中的主要观测目标。因此在星暴过程中, 如果小质量恒星比大质量恒星先形成, 就不能完全排除真正的第一代恒星的存在^[40]。

模型 2: Truran 和 Cameron^[41] 于 1971 年提出在金属丰度为零的环境中的初始质量函数形成恒星的截止质量高于 $0.9M_{\odot}$ 。因为初始质量低于 $0.9M_{\odot}$ 的恒星, 其主序年龄大于哈勃时间, 到现在还未离开主序向红巨星演化。如果最初形成恒星的截止质量高于 $0.9M_{\odot}$, 则现在不可能还有第一代恒星存在。

模型 3: Lin 和 Murray^[42](以下简称 LM)1992 年提出未能探测到第一代恒星的原因是因为金属丰度为零的环境下的初始质量函数决定了在第一代恒星的形成过程中, 大质量的恒星占大多数 (top-heavy), 低质量第一代恒星的数目极少。因而, 按照 LM 的这一观点, 最终会找到“真正的第一代恒星”。

模型 4: 1986 年, Cayrel^[43] 提出了“脏”的星族 III 恒星模型来解释为什么没有观测到零金属丰度恒星的存在。该模型假设: 在原始的 ISM 中, 星云的引力塌缩在其中心部分首先直接形成大质量恒星, 之后相对于超新星爆发后产生的激波仍在继续下落的冷气体形成了被污染的低质量恒星。这些被污染的低质量恒星和大质量第一代恒星基本上同时形成, 称其为“脏”的星族 III 恒星。

模型 5: Yoshii(1985)^[44] 和 Yoshii 等人 (1995)^[45] 提出了与上面完全不同的观点。我们已经观测到了第一代恒星, 但其金属丰度不再为零。模型假设当第一代恒星穿过银河系引力场时, 它从周围环境中吸积了一定量的被污染的 (已经增丰的)ISM, 从而导致第一代恒星表面被污染而使其金属丰度不为零。

模型 6: 最近, Tsujimoto、Shigeyama 和 Yoshii^[46](以下简称为 TSY) 提出的星系晕的化学演化模型预言第一代恒星肯定存在。并指出如果取第一代恒星的 IMF 为 Salpeter 的 IMF 形式。估计每 $10^3 \sim 10^4$ 颗晕星样本中可以找到一颗星族 III 恒星。同时 TSY 认为, 不断地寻找极端贫金属丰度的恒星以增加 BPS 巡天样本, 为最终找到第一代恒星提供了极大的希望。但是如果原始气体的 IMF 不同于 Salpeter 的 IMF 形式, 而是有利于形成大质量的恒星^[47,48], 或由于吸积 ISM 导致零金属星的表面丰度的污染^[45], 则观测到第一代恒星的可能性减少。

此外, 基于 Yoshii(1985)^[44] 和 Yoshii(1995) 等人^[45] 提出的吸积模型, Lu 等人^[49] 和 Shi 等人^[50] 对由于吸积导致第一代恒星表面被污染的金属丰度程度进行了估算。

4 结论与进展

通过上面的讨论, 关于第一代恒星的事实是: (1) 尽管有对遥远天体深度曝光的 BPS 巡天, 迄今为止还没有发现一颗金属丰度为零的恒星; (2) BPS 巡天探测极端贫金属恒星的最低金属丰度值为 -4.1 ; (3) 到目前为止, 已知金属丰度值在 -4 到 -3 之间的恒星数目大约有 100 多颗; (4) 星族 III 恒星的运动学特征类似于传统的星族 II 恒星。实际

上, 星族 III 恒星为非盘星, 在太阳附近的位置处, 其速度椭圆扁平, 而在距离银河系中心较大距离处, 其速度椭圆不如晕星的扁平; (5) 从星系形成和宇宙学角度而言, 星族 III 恒星的形成年代对应于红移 $z \geq 5$ 。

理论上, 要找到“真正第一代恒星”的关键是确定其形成时的初始质量函数。因为恒星初始质量函数, 即形成恒星的质量分布函数, 根本地决定了恒星系统的特性及其演化。例如质量低于 $0.9M_{\odot}$ 的恒星到现在还未演化而离开主序, 并具有严格的宇宙大爆炸之后原始气体星云的化学成分。然而关于恒星的初始质量函数是否在某些恒星质量处具有峰值、初始质量函数在形成恒星时是否具有一个特定质量或截止质量, 目前的证据仍然十分贫乏^[51~54]。关于恒星的初始质量函数, 目前普遍认为宇宙早期的大中质量恒星比小质量恒星的数目多^[55,56], 对该观点的支持主要源于: 至今没有观测到零金属丰度的恒星、普遍存在的 G 矮星问题、星团中重元素的高丰度和高红移星系中大质量恒星的高形成率等观测证据。恒星的初始质量函数仍不是十分确定, 有待于进一步的观测证据限定。

观测上, 人们期望 BPS 巡天能给出更多的、更完备的极端贫金属恒星的样本, 为现有的理论模型提供更多的观测的证据。为了获取更多的、更完备的极端贫金属恒星的样本, 许多巡天计划已经启动或准备启动。通过这些巡天, 人们期望能找到真正的 (bona-fide) 星族 III 恒星。目前新涉及极端贫金属恒星巡天的工作有: (1) The Hamburg/ESO Survey (HES)^[55]。HES 巡天工作基本覆盖了整个银河系南部, 所达到的极限星等为 $B \approx 17 \sim 17.5 \text{ mag}$, 比 BPS 巡天的极限星等暗 $1 \sim 1.5 \text{ mag}$ 。由于极限星等每增加 1 mag 导致巡天的体积增加 4 倍, 因此 HES 巡天最终证认的极端贫金属恒星的数目将是 BPS 巡天所证认的 5 到 10 倍。HES 巡天对于 BPS 巡天的真正优势在于 HES 巡天的棱镜光谱的质量、较大的波长范围和自动选择的判据等; (2) 利用 Broad-Band Colorimetric Surveys (BBCS)、Narrow-Band Colorimetric Surveys (NBCS) 和 Wide-Field Spectroscopic Surveys (WFSS) 方法探测极端贫金属恒星正在试验中^[1], 因为这些极端贫金属恒星巡天的方案最终可否有用, 取决于巡天的效率 EY 。而 $EY = (\text{金属丰度 } [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.0 \text{ 的恒星数}) / (\text{目标星的总数})$ 。理想的 EY 应大于 50% ^[1]。

致谢 作者感谢与上海天文台束成钢研究员及常瑞香博士的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 Beers T C. In: Weiss A, Abel T G, Hill V eds. The First Stars: proceedings of the MPA/ESO workshop, Garching, Germany, 1999, Berlin: Springer, 2000: 3
- 2 Ostriker J P, Gnedin N Y. *Ap. J.*, 1996. 472: L63
- 3 Umemura M, Loeb A, Turner E. *Ap. J.*, 1993, 419: 459
- 4 Cowie L L, Songaila A, Kim T S et al. *A. J.*, 1995. 109: 1522
- 5 Songaila A, Cowie L L. *A. J.*, 1996. 112: 335
- 6 Rees M. *Space Sci. Rev.*, 1998, 84: 43
- 7 Penzias A A, Wilson R W. *Ap. J.*, 1965, 142: 419
- 8 Gamow G. *Phys. Rev.*, 1948, 70: 572
- 9 Alpher R A, Folin J W Jr, Herman R C. *Phys. Rev.*, 1953, 92: 1347

- 10 Peebles P J. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 16: 410
- 11 Schramm D N, Wagoner R V. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 1997, 27: 37
- 12 Morgan W W, Keenan P C, Kellman E. *Atlas of stella spectra*, Chicago: University of Chicago Press, 1943
- 13 Chambelien J W, Aller L H. *Ap. J.*, 1951, 114: 52
- 14 Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 1957, 29: 547
- 15 Pagel B E J, Patchett B E. *M.N.R.A.S.*, 1975, 172: 13
- 16 Tinsley B M. *Fund. Cosm. Phys.*, 1980, 5: 287
- 17 Wyse R F G, Gilmore G. A. J., 1995, 110: 2771
- 18 Rocha-Pinto H J, Maciel W J. *M.N.R.A.S.*, 1996, 279: 447
- 19 Cayrel R. *Astron. Astrophy. Rev.*, 1996, 7: 217
- 20 Fouts G, Sandage A. A. J., 1986, 91: 1189
- 21 Sandage A, Fouts G. A. J., 1987, 93: 74
- 22 Sandage A, Kowal C. A. J., 1986, 91: 1140
- 23 Carney B W, Latham D W, Larid J B *et al.* *A. J.*, 1994, 107: 2240
- 24 Norris J E, Ryan S G, Beers T C. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1999, 123: 639
- 25 Norris J E. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1986, 61: 667
- 26 Bond H E. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1980, 44: 517
- 27 Bond H E. *Ap. J.*, 1981, 248: 606
- 28 Beers T C, Preston G W, Shectman S A. A. J., 1985, 90: 2089
- 29 Beers T C, Preston G W, Shectman S A. A. J., 1992, 103: 1987
- 30 Beers T C. In: Faber S ed. *Eight Santa Cruz Workshop in Astronomy and Astrophysics*, Berlin: Springer, 1986, 41
- 31 Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. *Ap. J.*, 1986, 136: 748
- 32 Norris J E, Ryan S G. *Ap. J.*, 1989, 340: 739
- 33 Chaboyer B, Kim Y C. *Ap. J.*, 1995, 454: 767
- 34 Richer H B, Fahlman G G, Vandenberg D A. *Ap. J.*, 1988, 329: 187
- 35 Paresce F, De Marchi G, Romaniello M. *Ap. J.*, 1995, 440: 216
- 36 Mazzitelli I, D'Antona F, Caloi V. *Astron. Astrophy.*, 1995, 302: 382
- 37 Butcher H R. *Nature*, 1987, 328: 127
- 38 Sneden C, McWilliam A, Preston G W. *Ap. J.*, 1996, 467: 819
- 39 Doom C, de Greve P, de Loore C. *Ap. J.*, 1985, 290: 185
- 40 Roy J R, Kunth D. *Astron. Astrophy.*, 1995, 294: 432
- 41 Truran J W, Cameron A G W. *Astrophys. Space. Sci.*, 1971, 14: 179
- 42 Lin D N C, Murray S D. *Ap. J.*, 1992, 394: 523
- 43 Cayrel R. *Astron. Astrophy.*, 1986, 168: 81
- 44 Yoshii Y. *Ap. J.*, 1985, 295: 521
- 45 Yoshii Y, Mathews G J, Kajino T. *Ap. J.*, 1995, 447: 184
- 46 Tsujimoto T, Toshikazu T, Yoshii Y. *Ap. J.*, 1999, 519: L63
- 47 Reid I N. In: Gilmore G, Parry I, Ryan S eds. *The stellar Initial Mass Function*, Proc. 38th Herstmonceux Conference, ASP Conferenc Series, 1998, 142: 121
- 48 Scalo J M. In: Gilmore G, Parry I, Ryan S eds., *The stellar Initial Mass Function*, Proc. 38th Herstmonceux Conference, ASP Conferenc Series, 1998, 142: 201
- 49 Lu Y, Zhao G, Shi J R. In: Cheng K S ed. *Stellar Astrophysics*, Proceedings of the Pacific Rim Conference, Hong Kong, 1999, Dordrecht: Kluwer, 2000: 393
- 50 Shi J R, Zhao G, Lu Y. In: Weiss A, Abel T G, Hill V eds. *The First Stars: Proceedings of the MPA/ESO Workshop*, Garching, Germany, 1999, Berlin: Springer, 2000: 187
- 51 Hillenbrand L A. A. J., 1997, 113: 1733
- 52 Mera D, Chabrier G, Baraffe I. *Ap. J.*, 1996, 459: L87

- 53 Massey P. In: Gilmore G, Parry I, Ryan S eds. The Stellar Initial Mass Function, Proc. 38th Herstmonceux Conference, ASP Conferenc Series, 1998, 142: 17
- 54 Scalo J M. In: Renzini A, Fabbino G, Gallagher J S eds. Windows on Galaxies, Dordrecht: Kluwer, 1990: 125
- 55 Larson R B. M.N.R.A.S., 1999, 301: L569
- 56 Wisotzki L, Köhler T, Groote D *et al.* Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1996, 115: 227

First Generation Stars

Lu Ye^{1,2,3} Zhao Gang¹ Liang Yanchun¹

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100012)

(2 Chinese Academy of Sciences-Peking University Joint Beijing Astrophysical Center, Beijing, 100871)

Abstract

The first generation stars mark the transition between the dark ages of the Universe and the appearance of the sky as we know it. Search for the first generation stars, (i.e., the population III stars, strictly with the chemical composition left by the Big Bang) has led to results that (1) No such stars were found, (2) Stars with metallicities significantly below $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ were exceedingly rare. Owing to a recent survey undertaken by Beers, Preston and Shectman (hereafter BPS), the number of known extremely metal-poor stars in the Galaxy has substantially increased. At present, the lowest metallicity star ever has found $[\text{Fe}/\text{H}] = -4.1$. And the number of stars discovered with $-4.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -3.0$ is above 100. The kinematics of these stars is similar to that of other halo stars. The formation processes, the initial mass function of the first generation stars and their existence in the present universe are not known with any certainty. On the other hand, one thing is sure—they did exist! The first generation stars are enigmatic entity which challenges to astronomical observation and theory largely. One may wonder why no population III has been found if more than 100 stars known with metallicities from $[\text{Fe}/\text{H}] = -4$ to -3 . Different kinds of explanations and observation programs have been proposed. In this paper, it is interesting to introduce some new progress about the first generation stars in the fields of the observation and theory.

Key words stars: population III—stars: abundances—galaxies: kinematics and dynamics