



致密天体在活动星系核吸积盘中的迁移

彭朋¹, 陈弦^{1,2*}

1. 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871

2. 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871

* 联系人, E-mail: xian.chen@pku.edu.cn

2024-05-27 收稿, 2024-07-14 修回, 2024-07-17 接受, 2024-07-18 网络版发表

国家自然科学基金(11991053)资助

摘要 对活动星系核吸积盘中恒星级致密天体的研究, 始于20世纪人们对类星体光谱中金属发射线的观测和理论研究工作. 近年来, 由于引力波观测取得的长足进展, 尤其是地面引力波探测器发现了一批大质量的恒星级双黑洞, 相关的理论研究更加受到人们的重视. 这些研究工作发现, 星体在活动星系核吸积盘中的迁移过程对理解大质量致密天体的形成和演化具有重要作用. 为了梳理这个领域的观测和理论进展, 并且总结未来可能的发展方向, 本文回顾了致密天体在活动星系核吸积盘中迁移的主要机制, 其中包括与吸积盘撞击导致的星体角动量损失、潮汐力矩激发的密度波对星体的反作用、气体非开普勒运动导致的星体吸积和动力学摩擦效应, 以及最近提出的一些新机制, 如热力矩以及第三体的引力影响等. 此外, 本文还总结了与致密天体迁移过程相关的天文学观测现象, 比如类星体金属增丰, 以及恒星级双致密天体或者极端质量比旋近产生的引力波等. 最后, 本文总结了该领域仍然存在的一些重要理论问题以及值得进一步研究的方向.

关键词 引力波, 致密天体, 活动星系核, 吸积盘, 流体力学

恒星级致密天体(如中子星、恒星级黑洞等)在活动星系核吸积盘中的形成和演化是一个既古老又年轻的研究课题. 对这个问题的研究可追溯到二十世纪八九十年代. 当时的研究目的主要是解释或者预测活动星系核在观测上的某些现象, 例如恒星是否可以落入超大质量黑洞从而提高黑洞吸积率并产生光变^[1,2], 或是解释高红移类星体金属丰度偏高的观测现象^[3]等. 这些研究往往涉及小天体(比如恒星或者恒星级质量黑洞)在活动星系核吸积盘中的迁移过程, 也即这些小天体的绕转轨道半径是否会由于与气体或者其他天体的相互作用而逐渐变化.

早期的研究发现, 如果活动星系核的吸积盘能够捕获或者因为气体的引力不稳定性形成许多恒星, 那

么这些恒星很可能通过快速吸积周围气体成长为大质量恒星^[2,3]. 这些大质量恒星演化到主序后阶段, 就可能成为致密天体, 并在吸积盘中形成双致密星, 最终引发引力波事件或者伽马射线暴等现象^[4]. 如果吸积盘中的致密天体足够多, 大量的并合还可能导致中等质量黑洞的形成^[5], 并产生一些独特的观测现象^[6].

近年来, 由于地面的LIGO、Virgo引力波探测器观测到了近百例恒星级双黑洞事件, 并且相当一部分黑洞在并合前就远远超过了银河系内X射线双星中黑洞的典型质量, 因此对活动星系核吸积盘中小天体、特别是致密天体的研究又变得火热起来. 这些最新的理论研究表明, 活动星系核的吸积盘中可能存在大量恒星级致密天体^[7,8], 其高密度以及与气体的多种动力学

引用格式: 彭朋, 陈弦. 致密天体在活动星系核吸积盘中的迁移. 科学通报, 2025, 70: 363–372

Peng P, Chen X. Migration of compact objects in active galactic nucleus accretion disks (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 363–372, doi: [10.1360/TB-2024-0565](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0565)

作用可能导致恒星级双黑洞在吸积盘中大量形成^[9]。此外, 这些小黑洞的质量往往会由于吸积气体以及多次并合不断增长^[10,11], 从而自然地解释为何LIGO/Virgo观测到的双黑洞质量较大(甚至超过100倍太阳质量)^[12]。

埋在吸积盘中的恒星级致密天体除了可能被LIGO/Virgo等地面音频(10~100 Hz)引力波探测器探测到, 还可能通过迁移的方式逐渐向内旋近并最终落入中心超大质量黑洞, 从而产生所谓的“极端质量比旋近”(extreme-mass-ratio inspiral, EMRI)或者“中等质量比旋近”(intermediate-mass-ratio inspiral, IMRI)系统^[13]。这种两体系统是未来空间毫赫兹引力波探测的重要波源^[14]。近期的一些研究发现, 活动星系核可能会贡献相当一部分未来探测器可观测到的极端质量比旋近事件^[15,16]。而致密天体在吸积盘中的迁移效应将会显著影响这种引力波源的事件率、物理参数以及动力学演化, 从而对这些源的引力波波波形以及后续观测产生影响。

本文将重点回顾致密天体在吸积盘中迁移的几种重要机制, 总结这种迁移带来的天文学观测现象, 并最终梳理出该领域仍然存在的一些重要问题以及今后值得深入研究的一些方向。

1 致密天体在吸积盘中的迁移机制

1.1 致密天体在活动星系核吸积盘中的形成

在讨论活动星系核吸积盘中致密天体的迁移机制之前, 我们首先简要介绍这些致密天体的来源。对这个问题的研究起源于吸积盘中恒星的形成问题。早期的研究试图寻找吸积盘中恒星导致的可观测特征^[2,17]。一方面, 考虑到活动星系中心同时存在吸积盘和星系核心星团, 星团中的恒星就可能与吸积盘发生相互作用。这些恒星的轨道面可能一开始并不与吸积盘平面重合, 但每当它们撞击并穿过盘面时, 其轨道相对于盘平面的倾角就会由于气体阻力而逐渐降低^[2], 最终可能完全落入盘平面中, 并导致可观测的光变^[2]。近年来的多体动力学模拟则发现, 这种作用可能会导致星团整体结构发生变化, 例如导致与吸积盘共面的恒星盘的产生^[18]。这种星团内恒星动力学参数的变化, 可能会导致大量恒星潮汐瓦解事件的发生^[19]。由此人们推测, 星团中的致密天体也会因为类似的原因而被吸积盘捕获, 这种捕获机制可能在活动星系核典型寿命内(上百万

到上千万年)捕获上千个恒星级黑洞^[7,8]。

另一方面, 在吸积盘外围, 盘的自引力不稳定性将导致大量恒星形成^[17,20]。因为本身形成机制^[17]和吸积气体^[21]的原因, 这种恒星的质量一般较高, 因此能在活动星系核典型寿命内演化为致密天体。不过, 吸积盘中的恒星具体如何形成演化暂时还未完全研究清楚, 比如吸积盘中辐射较强的环境中恒星如何形成^[22], 以及恒星吸积低金属丰度气体后如何进一步演化^[21,23]等问题, 都有待进一步的研究。

1.2 致密天体撞击吸积盘导致的能量角动量损失

在研究恒星与吸积盘相互作用时, 人们已经发现这些恒星的轨道参数会发生演化^[24,25]。尤其是在流体力学摩擦力与激波的作用下, 恒星的轨道半径往往会在整体上降低^[26]。这种过程一定程度上同样适用于致密天体。不过致密天体的物理尺度远小于其引力可影响的范围, 因此与吸积盘撞击时, 相互作用截面 S 一般由Bondi-Hoyle-Lyttleton吸积半径决定^[3]。假设撞击时致密天体质量为 m_1 , 与气体相对速度为 v_{rel} (v_{rel} 一般远大于气体声速 c_s), 则作用截面 $S = \pi R_{\text{BHL}}^2 = \pi G^2 m_1^2 / v_{\text{rel}}^4$ 。设相对速度垂直于吸积盘面方向分量为 v_{perp} , 则穿过高度为 $2h$ 的吸积盘时长为 $2h/v_{\text{perp}}$ ^[2]。假设盘的面密度为 Σ , 体密度为 $\rho = \Sigma/2h$, 则每当小天体撞击并穿过盘平面时, 会有总质量为 $S v_{\text{rel}} 2h / v_{\text{perp}} \Sigma / 2h = S \Sigma v_{\text{rel}} / v_{\text{perp}}$ 的气体因为撞击而被小天体吸积。考虑到动量守恒, 在这次撞击中, 小天体的这个速度分量会改变 $\sim S \Sigma v_{\text{rel}} / (v_{\text{perp}} m_1)$ 倍^[24], 总的效果是轨道能量的损失。由于每个小天体的轨道周期 T_0 内小天体与盘会撞击两次, 于是致密天体的轨道能量损失时标即迁移时标为

$$T_{\text{hit}} = \frac{v_{\text{perp}} m_1}{2 S \Sigma v_{\text{rel}}} T_0 = \frac{v_{\text{perp}} v_{\text{rel}}^3}{G^2 m_1 \Sigma} T_0, \quad (1)$$

这个时标的长短很大程度上依赖于致密天体轨道与吸积盘的夹角。比如, 考虑 $10^8 M_{\odot}$ 超大质量黑洞附近的吸积盘, 其在 $10^2 \sim 10^5$ 史瓦西半径(R_s)附近的典型面密度为 $\Sigma = 10^5 \text{ g cm}^{-2}$ 。当轨道与吸积盘的夹角较小时, 近似有 $v_{\text{perp}} \sim v_{\text{rel}} \sin \theta$, 其中 v_k 为开普勒速度, θ 为夹角。于是, $T_{\text{hit}} \sim 10^{11} \text{ yr} \sin^4 \theta$ 。当夹角较小, 比如 $\sin \theta < 0.1$ 时, 致密天体会在吸积盘典型寿命(上百万到上千万年)内被捕获并且产生明显迁移; 而当夹角较大时, 这种机制则无效。

值得一提的是, 当小天体撞击吸积盘时, 激波耗散

和动力学摩擦也可能造成小天体轨道能量的损失,从而导致迁移^[27]. 其中,激波耗散过程适用于恒星撞击吸积盘,其具体造成的能量损失可以由恒星穿过盘时撞击到的气体总量估计^[27]. 具体计算时,只需将上面推导中的吸积半径改为恒星半径即可. 当小天体轨道与吸积盘平面夹角较大,或者轨道半径较小时,激波耗散将更加有效. 另一方面,动力学摩擦过程一般适用于致密天体撞击吸积盘. 这种机制产生的摩擦力与上述吸积过程造成的等效“摩擦力”,也即吸积过程造成的致密天体动量变化率,在量级上是一致的^[27].

1.3 致密天体在盘中激发密度波导致的I型迁移

致密天体已经埋在吸积盘中之后,会在气体中激发密度波,进而转移其轨道能量和角动量. 这种效应造成的迁移被称作I型迁移. 事实上,对I型迁移的研究起源于对行星系统的理论研究^[28,29],这些研究关注原行星盘中质量大概是 10^{-6} ~ 10^{-5} 太阳质量的行星的迁移情况. 其主要原理是迁移天体在盘中激发出向内或向外传播的密度波^[28],这种密度波会反作用于迁移天体,引起轨道能量和角动量的转移^[29]. 值得注意的是,迁移天体在盘的部分区域激发出的密度波会供负力矩,即降低迁移天体的角动量,使其向内迁移,而在另一区域激发出的密度波会提供正力矩,倾向于使迁移天体向外迁移^[29]. 一般情况下,两者不能互相抵消,相加后提供的净力矩不为零,其符号与盘的具体性质有关^[30]. I型迁移力矩导致的迁移时标为^[31]

$$T_I = \left(\frac{h}{r}\right)^2 \frac{M}{\pi \Sigma r^2} \frac{M}{m_1} T_0 = 10^5 \left(\frac{m_1}{10 M_\odot}\right)^{-1} \left(\frac{M}{10^8 M_\odot}\right) \times \left(\frac{h/r}{0.01}\right)^2 \left(\frac{\Sigma}{10^5 \text{ g cm}^{-2}}\right)^{-1} \left(\frac{r}{10^3 R_s}\right)^{-1/2} \text{ yr}, \quad (2)$$

其中, M 为中心天体质量, r 为迁移天体轨道半径. 可以看出,这种迁移机制是十分有效的,其典型时标往往短于活动星系核的典型寿命(上百万到上千万年).

人们很早就将I型迁移运用到活动星系核系统来研究吸积盘中恒星的运动. 例如,有些工作比较了恒星在吸积盘中迁移的时标与恒星演化时标,发现大部分恒星会在落入超大质量黑洞前演化到主序后阶段^[3]. 另外,人们发现吸积盘外区形成的恒星可能会向内迁移到更靠近超大质量黑洞的区域,从而解释了银河系中心超大质量黑洞附近年轻恒星的形成^[13]. 这个工作也同时将这种迁移应用到吸积盘中的致密天体上,并提

出这些致密天体向内迁移可能会导致引力波的产生^[13]. 此外,在某些盘结构较为特殊的区域,例如面密度或者温度随半径急剧变化的地方,I型迁移的方向会发生改变,从而形成“迁移陷阱”(migration trap)^[32],其位置根据盘参数的不同大概分布在 10^2 ~ 10^4 史瓦西半径附近. 致密天体移动到迁移陷阱附近后,由于迁移力矩符号改变,无法继续往同方向迁移,从而停在这个半径附近,这会导致丰富的动力学现象. 值得一提的是,如果迁移天体的轨道偏率以及倾角不为零,则激发的密度波会倾向于将轨道快速圆化和共面化. 这种圆化机制在偏率和倾角不太大时甚至会远短于上述提到的I型迁移时标^[33].

1.4 中等质量黑洞在盘中开沟后引发的II型迁移

上述密度波理论中迁移天体的质量越大,其激发的密度波振幅也就越高. 当质量足够大时,密度波的振幅与盘原本的面密度相比,就不能视为一种扰动,那么上述方法计算出的力矩也就不再适用. 对于后面这种情况下迁移的研究,也始于对于行星系统(例如双星以及恒星周围行星)的研究^[34-37]. 当迁移天体的质量足够大时(比如 $m_1/M > 0.001$ ~ 0.0001),其轨道半径附近一定区域的气体会被迁移天体的潮汐力排空^[34,35],从而产生一个低面密度的环,这个过程被称为迁移天体“开沟”^[36]. 后续的工作将这种开沟现象的研究扩展到更高质量比^[38],例如双星系统中(比如 $m_1/M = 0.01$ ~ 0.1). 开沟之后天体的迁移被称为II型迁移. 理想情况下,迁移天体会被锁定在盘的沟中随着两侧的气体一起向内以黏滞时标迁移^[37]:

$$T_{II} = \alpha^{-1} \left(\frac{h}{r}\right)^{-2} T_0 = 10^6 \left(\frac{M}{10^8 M_\odot}\right) \left(\frac{h/r}{0.01}\right)^{-2} \times \left(\frac{\alpha}{0.01}\right)^{-1} \left(\frac{r}{10^3 R_s}\right)^{3/2} \text{ yr}, \quad (3)$$

其中, α 为吸积盘黏滞参数. 可以看出,对于吸积盘中可开沟的致密天体,这种迁移机制也是比较有效的. 但是在吸积盘外区,即 r 较大时,此时标会迅速增长. 当然,上述的II型迁移模型来自理想条件下的理论推导,即由于气体黏滞作用与迁移物体潮汐力矩相互平衡,并且迁移物体将沟内气体完全排空,最终导致迁移物体完全锁定在周围气体的黏滞演化中. 然而,近期的一些数值模拟表明,上述理想条件往往并不能完全实现,例如沟内的气体并不一定完全排空,并且有部分气体会在迁

移过程中穿越迁移物体开的沟^[39,40]。上述过程可能会导致最终得到的迁移速度与传统模型完全不同,比如迁移速度会显著依赖于开沟后沟底部气体的面密度^[41],以及沟附近气体的具体分布等^[42]。另一方面,有些数值模拟表明即使在这种情况下,迁移速度依然与黏滞时标有紧密的联系^[43],或者当盘的面密度足够大时,数值模拟会在一定时间(往往是黏滞时标)后再次给出传统的II型迁移速度^[44]。总而言之,对于这个迁移时标的研究仍在继续,其往往会依据具体情况给出不同的结果。

对于活动星系核,这种开沟现象以及II型迁移理论一开始被应用于解决超大质量双黑洞的并合问题^[45,46]。后续的一些数值模拟也发现这种迁移机制可以帮助超大质量双黑洞在10 Myr内并合^[47]。然而,近期的数值模拟表明,超大质量双黑洞在有气体盘情况下的并合远比II型迁移复杂,其过程受到双黑洞本身吸积过程以及双黑洞盘和双黑洞本身椭圆率和倾角的显著影响。事实上,气体盘究竟会使得超大质量双黑洞趋向于并合还是分离,依然需要进一步研究。

对于吸积盘中恒星级致密天体,其质量一般不足以开沟。然而已经有许多研究发现,由于超大质量黑洞的引力势阱很深,周围吸积盘中的恒星级双黑洞在并合后不容易逃出吸积盘,因此这些小黑洞会不断经历并合。加上气体吸积过程,小黑洞的质量会不断增加,最终可能自然形成100~1000倍太阳质量的中等质量黑洞^[5]。这种中等质量黑洞就可能满足开沟条件,导致其迁移速率与恒星级质量黑洞完全不同。

值得一提的是,最近很多研究发现致密天体在盘中由于极高的吸积率,其反馈作用可能在其位置附近产生明显的气体空洞^[48]。这种空洞是否会造成类似于开沟之后II型迁移的效果,还有待进一步研究。

1.5 气体与致密天体转速不同导致的迁移

当吸积盘吸积率较高时,气体绕中心超大质量黑洞旋转的速度会偏离开普勒速度 v_k ^[49]。在这种情况下,小天体与气体旋转速度的不同也会导致小天体轨道角动量变化,从而引起迁移。由于这种迁移机制往往只在吸积盘内区有明显效果,其一开始主要被应用于靠近超大质量黑洞的致密天体,如已经构成EMRI和IMRI的小黑洞上^[50,51]。具体来说,在高吸积率情况下,气体的温度足够高,导致较高的径向气体压强梯度。取决于梯度方向,这种效应可以抵消或者增加一部分气体的离

心力,导致气体旋转速度的改变^[49,52]。近些年的一些数值模拟也复现了类似现象^[53]。另一方面,致密天体由于作用截面小,很难被盘中气体压强影响,故其转速依然会保持在开普勒速度 v_k 。最终,气体与致密天体旋转速度的不同会导致致密天体的运动发生改变。

与1.2节提到的撞击机制不同,这里气体与致密天体的相对速度往往远小于声速 c_s 。研究这种迁移机制的工作往往会使用流体力学摩擦^[54]或者Bondi-Hoyle-Lyttleton吸积模型来计算迁移时标^[16,55]。这两种计算得到的迁移力矩在量级上是一致的。比如,对于Bondi-Hoyle-Lyttleton吸积模型,其迁移力矩是 $\dot{m}_{\text{BHL}} v_{\text{rel}} = 4\pi R_{\text{BHL}}^2 \rho c_s v_{\text{rel}}$,则相应的迁移时标为

$$T_{\text{wind}} = \frac{v_k m_1}{4\pi R_{\text{BHL}}^2 \rho c_s v_{\text{rel}}} T_0 = \frac{v_k c_s^4}{4\pi^2 G^2 m \Sigma v_{\text{rel}}} T_0. \quad (4)$$

代入1.2节中提到的典型值,并利用静力学平衡条件 $c_s \sim h v_k / r$,可以得到:

$$T_{\text{wind}} \sim 10^6 \left(\frac{h/r}{0.01} \right)^4 \left(\frac{v_{\text{rel}}/v_k}{10^{-4}} \right)^{-1} \text{ yr}.$$

一般来说,在吸积盘外区,由于 v_{rel}/v_k 较小,此机制相对于I型迁移较弱。但是在吸积盘内区,由于压强增大,气体速度偏离开普勒速度较多,此机制就变得重要起来。值得一提的是,如果埋在吸积盘中的致密天体绕转方向与盘中气体绕转方向反向,致密天体相对于盘中气体的运动速度就会达到 $2v_k$ (远大于声速 c_s),这就会导致致密天体快速向内迁移。在后面这种情况下,致密天体的迁移过程可能会在较短时标内激发轨道椭圆率^[56],此后的演化过程和引力波信号会与正转情况下的结果有很大不同。

1.6 其他迁移机制

除了上述应用范围较广的迁移机制之外,也有其他一些应用情况较为特殊或者还在初步研究阶段的迁移机制。比如在1.3节讨论密度波理论时,相关研究只考虑迁移天体对周围气体的引力效应。实际上,迁移天体(如吸积盘中的小黑洞)会吸积周围的气体,并产生一定的反馈作用。比如,反馈的热能会改变周围气体的温度,从而改变气体的动力学性质,最终改变迁移天体受到的力矩^[57]。另外,除了与气体相互作用外,致密天体之间的相互作用也会影响它们的迁移。比如,吸积盘中的中等质量黑洞就可能将轨道内的恒星级黑洞锁定在共

振带内, 迫使它们与自己同步迁移, 最终造成EMRI和IMRI事件的同时爆发^[58]。

2 致密天体在盘中迁移相关的观测现象

2.1 吸积盘中金属丰度增丰

小天体在吸积盘中的迁移会产生许多重要的天文学观测现象。虽然本文主要关注致密天体在吸积盘中的迁移, 但是考虑到关于吸积盘中小天体迁移的研究开始于对恒星迁移的研究, 本节简单回顾和恒星迁移相关的观测现象: 恒星演化导致的吸积盘金属丰度增丰^[3]。观测上发现, 不同于星系大部分区域金属丰度随红移有较明显的增丰, 对活动星系核宽线区的观测发现其金属丰度早在较高红移(如红移4~6)就已经和邻近星系的金属丰度在量级上接近^[59]。这就说明活动星系核内应该有某种天体物理过程导致宽线区快速增丰。理论上发现活动星系核吸积盘外区由于引力不稳定造成的恒星形成可以大致给出与观测相符合的金属丰度演化趋势^[60]。在这个过程中, 恒星在吸积盘中的迁移会影响其具体演化过程。比如, 恒星在盘中向内迁移的时标长短会决定其在落入中心超大质量黑洞前是否可以演化到主序后阶段^[3]。另外, 恒星的迁移会改变周围气体的物理参数, 改变恒星的吸积细节, 最终影响恒星的演化^[21]。

2.2 恒星级致密双星的形成及其引力波辐射

对于致密天体, 迁移会导致引力波源的产生和演化。本节主要回顾恒星级致密双星(包括双黑洞、双中子星、中子星-黑洞等)在吸积盘中的形成以及引力波信号特征。

McKernan等人^[5]2012年的工作首先注意到由于致密天体在吸积盘中的迁移速率依赖于致密天体本身的质量, 导致质量较大的致密天体在向内迁移的过程中会遇到质量较小的致密天体, 并以类似于类木行星捕获小行星的方式捕获较小的致密天体, 进而增加自身质量最终成为中等质量黑洞。在LIGO/Virgo观测到引力波事件后, 关于吸积盘中双黑洞形成并合的工作逐渐丰富起来。例如一些工作通过计算发现, 气体摩擦以及第三体的动力学效应会大大加快吸积盘中双黑洞的形成与并合^[61,62]。这之后的工作将引力波辐射以及轨道偏率的影响也考虑了进来^[63]。

致密双星形成速率的加快, 主要得益于与迁移有

关的两个方面。一方面, 一些初步的工作已经注意到致密天体在迁移过程中会保持在近圆共面轨道, 当两个天体的轨道相遇时, 其相对速度也足够低, 有助于双黑洞的产生^[5,64]。后续的工作更细致地考虑了相遇时双黑洞的产生方式: 当两者轨道半径差值足够小, 比如其轨道半径差值小于两者的Hill半径时, 它们的动力学会受到两者本身引力的影响^[9]。另一方面, 气体摩擦等效效应会帮助耗散两者之间的相对轨道能量, 从而有助于形成致密双星^[9]。近期的数值模拟发现, 致密双星形成过程比上述模型更加复杂, 结果依赖于轨道靠近时的动力学不稳定性, 以及致密天体周围气体具体的密度分布等^[65-67]。但是, 致密天体迁移过程导致的相遇以及相遇时较低的相对速度依然是致密双星能有效形成的重要前提。

另外, 1.3节中提到的I型迁移力矩所造成的迁移陷阱会进一步帮助致密双星的形成^[64,68]。其原因在于盘中的致密天体会不断向迁移陷阱聚集, 显著提高迁移陷阱附近致密天体的数密度, 最终显著提高致密天体之间相互作用的概率^[10,68]。这种迁移陷阱附近形成的致密双星会进一步由于高密度而导致的多体相互作用而加快并合^[69]。这些效应最终会导致许多恒星级致密天体通过多次并合而快速提高质量^[10], 最终形成100~1000倍太阳质量的中等质量黑洞^[68]。

除了I型迁移陷阱之外, 1.5节中提到的气体与致密天体的相对速度效应也可能造成另一种迁移陷阱, 即所谓的“最后迁移陷阱”^[70]。由于高吸积率吸积盘会在约10倍史瓦西半径附近形成压强峰值, 这一方面是由于考虑相对论效应下的有效势会在靠近施瓦西半径附近存在极点; 另一方面, 在吸积率较高的吸积盘内区, 根据slim盘模型, 其径向内流较强, 并且径向流在能量平衡中成为主导项, 这与吸积盘外区中能量主要由辐射带走不同, 将会导致吸积盘包括压强在内的各个参数随半径变化方式与外区有较大的不同。因此, 压强峰值的存在需要吸积盘吸积率较高, 且只存在于靠近史瓦西半径附近。这种压强峰值会导致在这个半径之外气体转速慢于致密天体, 而在这个半径之内则是相反, 最终导致致密天体迁移到压强峰值附近并被困在此处。可以想象, 形成在这里的致密双星所辐射的引力波信号会强烈地受到超大质量黑洞的影响^[71-73]。

值得一提的是, 1.6节中提到的热力矩也会带来另一种迁移陷阱^[57]。这是由于热力矩的具体方向依赖于迁移物体的产热(即小黑洞的吸积产热)以及气体具体

的热力学性质,因此在某些区域也会发生力矩方向的改变.由于其机制来自小黑洞吸积反馈导致的气体结构非对称性,这种迁移陷阱的发生可能比I型迁移陷阱更不依赖于盘的具体结构.这种迁移陷阱的位置一般在 $10^2\sim 10^4$ 史瓦西半径附近,并且只发生在超大质量黑洞质量不是过大($\leq 10^8$ 太阳质量)的情况下^[57],这是由于当中心黑洞质量较大时,相对而言小黑洞的吸积产热就更加不重要了.

2.3 极端质量比、中等质量比旋近的形成和吸积盘带来的影响

致密天体在活动星系核吸积盘中的迁移除了会促进并影响恒星级致密双星的形成之外,也会影响EMRI或者IMRI的形成和演化. EMRI与IMRI由超大质量黑洞与绕转大黑洞的恒星级质量黑洞或中等质量黑洞组成,大、小黑洞的质量比分别为 10^{-5} 与 10^{-3} 左右.当小黑洞旋近到距离超大质量黑洞大约10倍史瓦西半径以内后,小黑洞绕转大黑洞产生的引力波信号就可能被毫赫兹引力波探测器观测到^[14].

由于EMRI和IMRI的形成需要小黑洞到达距离超大质量黑洞足够近的区域,因此吸积盘中致密天体的迁移效应自然会与EMRI和IMRI的形成联系起来.上文已经提到,Levin^[13]2007年的工作在研究吸积盘内恒星的迁移时,就已经提出这些恒星演化成的致密天体会进一步由于I型或者II型迁移机制向内转移,并在1~10 Myr内与超大质量黑洞并合.进一步地,后续的工作具体估算了吸积盘外区恒星产生的速率及其后续的迁移、吸积时标,发现活动星系核可以贡献相当一部分未来可观测的EMRI和IMRI($0.5\sim 10\text{ yr}^{-1}\text{ Gpc}^{-3}$)^[74].在某些情况下,即使I型迁移的方向变为向外从而产生所谓的I型迁移陷阱,相对速度导致的迁移效应也能导致小黑洞越过I型迁移陷阱^[16].之后的工作具体计算了由吸积盘捕获的小黑洞在各类迁移机制共同作用下形成EMRI的速率,得到的结果在量级上与吸积盘内恒星贡献的EMRI事件率大致相当^[15].

上述这些吸积盘中迁移机制导致的EMRI被称为wet EMRI,以区别于贫气体的正常星系核心由动力学多体作用产生的传统EMRI^[16].这些wet EMRI和wet IMRI,由于受到1.3节中提到的气体耗散作用的影响,在进入毫赫兹波段时往往具有较低的轨道偏率,并且与中心超大质量黑洞的赤道面之间的倾角较小.相比之下,贫气体星系核中的传统EMRI和IMRI往往具有很

高的轨道偏率以及轨道倾角^[14].这些差别都比较容易从引力波信号中分析出来.

值得注意的是,即使在wet EMRI和IMRI已经进入引力波辐射主导的阶段,气体迁移力矩依然能一定程度上影响轨道能量的改变.20世纪研究高吸积率吸积盘模型的一些工作发现,在某些情况下,相对速度导致的气体迁移力矩会显著改变EMRI和IMRI向内旋近的速率,从而严重影响它们的波形^[50,51].后续的工作考虑了更实际的吸积盘以及致密天体参数,发现在这种情况下,虽然迁移力矩的影响远低于引力波辐射,但是由于EMRI信号积累时间较长,吸积盘对波形的微扰依然是能观测到的^[75,76].进一步地,一些流体动力学模拟表明如果不考虑这种天体物理环境效应,对EMRI/IMRI的参数估计就可能发生系统偏差^[77,78].

如1.4节所讨论的,吸积盘中往往会由于层级并合以及气体吸积等机制形成可以开沟的中等质量黑洞.这种中等质量黑洞的迁移速率与恒星级质量黑洞完全不同.如果吸积盘中同时存在中等质量黑洞与恒星级黑洞(例如在迁移陷阱附近),两者就会因为1.5中所论述的原因在相遇后以同样的速率向内迁移.当它们迁移到距离超大质量黑洞附近时,就可能形成一对EMRI和IMRI,并同时出现在毫赫兹引力波探测器的探测窗口中^[58].由于这样形成的EMRI和IMRI仍在相互作用,其波形与单独的EMRI或IMRI也是完全不同的.

3 总结与展望

与致密天体在活动星系核吸积盘中迁移相关的观测以及理论研究依然存在许多问题.首先在观测上,目前仍然只得到了一些间接的观测证据,例如活动星系核的金属丰度较高,以及银河系和部分近邻星系核心存在围绕超大质量黑洞的恒星盘等.由于活动星系核本身光度较高,很容易遮盖盘中恒星级致密天体产生的辐射,因此直接的电磁波观测较为困难.最近理论上工作表明,致密双星在并合前后能够产生光学直到X射线的可被观测的光变^[48,79,80].观测上,人们也开始发现一些疑似的活动星系核中引力波源并合造成的电磁波爆发^[81],但其本质依然存在较大争议.可以预见的是,我国的爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)卫星以及中国巡天空间望远镜等会极大地促进对上述问题的观测研究.

另一方面,致密双星并合或者EMRI、IMRI等事件产生的引力波信号蕴含着它们形成、演化的信息.比

如, 2.2节提到从超大质量黑洞附近辐射出的引力波信号会受到红移、多普勒频移、引力透镜等效应的影响, 2.3节提到迁移效应会造成EMRI和IMRI的引力波相位发生漂移, 并且可能形成波形特殊的EMRI-IMRI对等. 新一代引力波探测器, 如ET、Cosmic Explorer、LISA、Taiji、TianQin等, 有可能帮助我们识别上述引力波信号, 从而促进我们对吸积盘中致密天体迁移过程的认识.

最后, 目前吸积盘中致密天体的迁移理论仍然比较初步. 尤其是第1节提到的各类迁移机制一开始都不

是在活动星系核吸积盘的情形下发展起来的, 因此很多结论并不完全适用. 比如, I型和II型迁移机制能较好地应用在比较平静且温度和黏滞并不很高的行星盘中. 但对于活动星系核的吸积盘, 至少靠内的区域吸积流并非完全平稳, 而是存在较强的湍流. 再比如, 吸积盘高电离度导致的强磁场也可能对迁移产生影响. 此外, 当致密天体离超大质量黑洞较近时, 就有必要考虑高速、高时空曲率带来的强相对论效应. 尽管已经有人做了一些先导性的理论工作^[82,83], 但彻底解决上述问题仍然需要大量细致深入的研究.

参考文献

- 1 Norman C, Silk J. The dynamics and fueling of active nuclei. *Astrophys J*, 1983, 266: 502–515
- 2 Syer D, Clarke C J, Rees M J. Star-disc interactions near a massive black hole. *Mon Not R Astron Soc*, 1991, 250: 505–512
- 3 Artymowicz P, Lin D N C, Wampler E J. Star trapping and metallicity enrichment in quasars and active galactic nuclei. *Astrophys J*, 1993, 409: 592–603
- 4 Cheng K S, Wang J. The formation and merger of compact objects in the central engine of active galactic nuclei and quasars: Gamma-ray burst and gravitational radiation. *Astrophys J*, 1999, 521: 502–508
- 5 McKernan B, Ford K E S, Lyra W, et al. Intermediate mass black holes in AGN discs—I. Production and growth. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 425: 460–469
- 6 McKernan B, Ford K E S, Kocsis B, et al. Intermediate-mass black holes in AGN discs—II. Model predictions and observational constraints. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 441: 900–909
- 7 Fabj G, Nasim S S, Caban F, et al. Aligning nuclear cluster orbits with an active galactic nucleus accretion disc. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 499: 2608–2616
- 8 Nasim S S, Fabj G, Caban F, et al. Aligning retrograde nuclear cluster orbits with an active galactic nucleus accretion disc. *Mon Not R Astron Soc*, 2023, 522: 5393–5401
- 9 Tagawa H, Haiman Z, Kocsis B. Formation and evolution of compact-object binaries in AGN disks. *Astrophys J*, 2020, 898: 25
- 10 Yang Y, Bartos I, Gayathri V, et al. Hierarchical black hole mergers in active galactic nuclei. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 181101
- 11 Tagawa H, Haiman Z, Bartos I, et al. Signatures of hierarchical mergers in black hole spin and mass distribution. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 507: 3362–3380
- 12 Secunda A, Bellovary J, Mac Low M M, et al. Orbital migration of interacting stellar mass black holes in disks around supermassive black holes. II. Spins and incoming objects. *Astrophys J*, 2020, 903: 133
- 13 Levin Y. Starbursts near supermassive black holes: Young stars in the Galactic Centre, and gravitational waves in LISA band. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 374: 515–524
- 14 Amaro-Seoane P, Gair J R, Freitag M, et al. Intermediate and extreme mass-ratio inspirals—Astrophysics, science applications and detection using LISA. *Class Quantum Grav*, 2007, 24: R113–R169
- 15 Pan Z, Lyu Z, Yang H. Wet extreme mass ratio inspirals may be more common for spaceborne gravitational wave detection. *Phys Rev D*, 2021, 104: 063007
- 16 Pan Z, Yang H. Formation rate of extreme mass ratio inspirals in active galactic nuclei. *Phys Rev D*, 2021, 103: 103018
- 17 Goodman J, Tan J C. Supermassive stars in quasar disks. *Astrophys J*, 2004, 608: 108–118
- 18 Just A, Yurin D, Makukov M, et al. Enhanced accretion rates of stars on supermassive black holes by star-disk interactions in galactic nuclei. *Astrophys J*, 2012, 758: 51
- 19 MacLeod M, Lin D N C. The effect of star-disk interactions on highly eccentric stellar orbits in active galactic nuclei: A disk loss cone and implications for stellar tidal disruption events. *Astrophys J*, 2020, 889: 94
- 20 Shlosman I, Begelman M C. Evolution of self-gravitating accretion disks in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 1989, 341: 685–691
- 21 Cantiello M, Jermyn A S, Lin D N C. Stellar evolution in AGN disks. *Astrophys J*, 2021, 910: 94
- 22 Chen Y X, Jiang Y F, Goodman J, et al. 3D radiation hydrodynamic simulations of gravitational instability in AGN accretion disks: Effects of

- radiation pressure. *Astrophys J*, 2023, 948: 120
- 23 Jermyn A S, Dittmann A J, McKernan B, et al. Effects of an immortal stellar population in AGN disks. *Astrophys J*, 2022, 929: 133
- 24 Vokrouhlicky D, Karas V. Stellar dynamics in a galactic centre surrounded by a massive accretion disc—I. Newtonian description. *Mon Not R Astron Soc*, 1998, 298: 53–66
- 25 Šubr L, Karas V. An orbiter crossing an accretion disc. *Astron Astrophys*, 1999, 352: 452–458
- 26 Rauch K P. Dynamical evolution of star clusters around a rotating black hole with an accretion disc. *Mon Not R Astron Soc*, 1995, 275: 628–640
- 27 Zhou C, Huang L, Guo K, et al. Probing orbits of stellar mass objects deep in galactic nuclei with quasiperiodic eruptions. *Phys Rev D*, 2024, 109: 103031
- 28 Goldreich P, Tremaine S. The excitation of density waves at the Lindblad and corotation resonances by an external potential. *Astrophys J*, 1979, 233: 857–871
- 29 Goldreich P, Tremaine S. Disk-satellite interactions. *Astrophys J*, 1980, 241: 425–441
- 30 Paardekooper S J, Baruteau C, Crida A, et al. A torque formula for non-isothermal type I planetary migration—I. Unsaturated horseshoe drag. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 401: 1950–1964
- 31 Ward W R. Protoplanet migration by nebula tides. *Icarus*, 1997, 126: 261–281
- 32 Bellovary J M, Low M M M, McKernan B, et al. Migration traps in disks around supermassive black holes. *Astrophys J Lett*, 2016, 819: L17
- 33 Tanaka H, Takeuchi T, Ward W R. Three-dimensional interaction between a planet and an isothermal gaseous disk. I. Corotation and lindblad torques and planet migration. *Astrophys J*, 2002, 565: 1257–1274
- 34 Lin D N C, Papaloizou J. Tidal torques on accretion discs in binary systems with extreme mass ratios. *Mon Not R Astron Soc*, 1979, 186: 799–812
- 35 Lin D N C, Papaloizou J. On the structure of circumbinary accretion disks and the tidal evolution of commensurable satellites. *Mon Not R Astron Soc*, 1979, 188: 191–201
- 36 Lin D N C, Papaloizou J. On the tidal interaction between protoplanets and the primordial solar nebula. II—Self-consistent nonlinear interaction. *Astrophys J*, 1986, 307: 395–409
- 37 Lin D N C, Papaloizou J. On the tidal interaction between protoplanets and the protoplanetary disk. III—Orbital migration of protoplanets. *Astrophys J*, 1986, 309: 846–857
- 38 Artymowicz P, Lubow S H. Dynamics of binary-disk interaction. 1: Resonances and disk gap sizes. *Astrophys J*, 1994, 421: 651–677
- 39 Duffell P C, Haiman Z, MacFadyen A I, et al. The migration of gap-opening planets is not locked to viscous disk evolution. *Astrophys J*, 2014, 792: L10
- 40 Dürmann C, Kley W. Migration of massive planets in accreting disks. *Astron Astrophys*, 2015, 574: A52
- 41 Kanagawa K D, Tanaka H, Szuszkiewicz E. Radial migration of gap-opening planets in protoplanetary disks. I. The case of a single planet. *Astrophys J*, 2018, 861: 140
- 42 Chen Y X, Zhang X, Li Y P, et al. Retention of long-period gas giant planets: Type II migration revisited. *Astrophys J*, 2020, 900: 44
- 43 Robert C M T, Crida A, Lega E, et al. Toward a new paradigm for Type II migration. *Astron Astrophys*, 2018, 617: 98
- 44 Scardoni C E, Rosotti G P, Lodato G, et al. Type II migration strikes back—An old paradigm for planet migration in discs. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 492: 1318–1328
- 45 Ivanov P B, Papaloizou J C B, Polnarev A G. The evolution of a supermassive binary caused by an accretion disc. *Mon Not R Astron Soc*, 1999, 307: 79–90
- 46 Gould A, Rix H W. Binary black hole mergers from planet-like migrations. *Astrophys J*, 2020, 532: L29–L32
- 47 Armitage P J, Natarajan P. Accretion during the merger of supermassive black holes. *Astrophys J*, 2002, 567: L9–L12
- 48 Wang J M, Liu J R, Ho L C, et al. Accretion-modified stars in accretion disks of active galactic nuclei: Gravitational-wave bursts and electromagnetic counterparts from merging stellar black hole binaries. *Astrophys J Lett*, 2021, 916: L17
- 49 Abramowicz M A, Czerny B, Lasota J P, et al. Slim accretion disks. *Astrophys J*, 1988, 332: 646–658
- 50 Chakrabarti S K. Binary black holes in stationary orbits and a test of the active galactic nucleus paradigm. *Astrophys J*, 1993, 411: 610–613
- 51 Chakrabarti S K. Gravitational wave emission from a binary black hole system in the presence of an accretion disk. *Phys Rev D*, 1996, 53: 2901–2907
- 52 Abramowicz M, Jaroszynski M, Sikora M. Relativistic, accreting disks. *Astron Astrophys*, 1978, 63: 221–224
- 53 Lančová D, Abarca D, Kluźniak W, et al. Puffy accretion disks: Sub-eddington, optically thick, and stable. *Astrophys J Lett*, 2019, 884: L37
- 54 Barausse E, Cardoso V, Pani P. Can environmental effects spoil precision gravitational-wave astrophysics? *Phys Rev D*, 2014, 89: 104059
- 55 Antoni A, MacLeod M, Ramirez-Ruiz E. The evolution of binaries in a gaseous medium: Three-dimensional simulations of binary Bondi–Hoyle–Lyttleton accretion. *Astrophys J*, 2019, 884: 22
- 56 Sánchez-Salcedo F J. Orbital evolution of gas-driven inspirals with extreme mass ratios: Retrograde eccentric orbits. *Astrophys J*, 2020, 897: 142
- 57 Grishin E, Gilbaum S, Stone N C. The effect of thermal torques on AGN disc migration traps and gravitational wave populations. *Mon Not R*

- [Astron Soc](#), 2024, 530: 2114–2132
- 58 Peng P, Chen X. Synchronizing the EMRIs and IMRIs in AGN accretion disks. [Astrophys J](#), 2023, 950: 3
- 59 Huang J, Lin D N C, Shields G. Metal enrichment due to embedded stars in AGN discs. [Mon Not R Astron Soc](#), 2023, 525: 5702–5718
- 60 Wang J M, Yan C S, Gao H Q, et al. Accretion disks in active galactic nuclei: Gas supply driven by star formation. [Astrophys J](#), 2010, 719: L148–L152
- 61 Bartos I, Kocsis B, Haiman Z, et al. Rapid and bright stellar-mass binary black hole mergers in active galactic nuclei. [Astrophys J](#), 2017, 835: 165
- 62 Stone N C, Metzger B D, Haiman Z. Assisted inspirals of stellar mass black holes embedded in AGN discs: Solving the ‘final au problem’. [Mon Not R Astron Soc](#), 2017, 464: 946–954
- 63 Gröbner M, Ishibashi W, Tiwari S, et al. Binary black hole mergers in AGN accretion discs: Gravitational wave rate density estimates. [Astron Astrophys](#), 2020, 638: A119
- 64 McKernan B, Saavik Ford K E, Bellovary J, et al. Constraining stellar-mass black hole mergers in AGN disks detectable with LIGO. [Astrophys J](#), 2018, 866: 66
- 65 Li J, Lai D, Rodet L. Long-term evolution of tightly packed stellar black holes in AGN disks: Formation of merging black hole binaries via close encounters. [Astrophys J](#), 2022, 934: 154
- 66 Li J, Dempsey A M, Li H, et al. Hydrodynamical simulations of black hole binary formation in AGN disks. [Astrophys J Lett](#), 2023, 944: L42
- 67 Li J, Rodet L, Lai D. Dynamical instability in multi-orbiter systems with gas friction. [Mon Not R Astron Soc](#), 2024, 528: 1198–1212
- 68 Secunda A, Bellovary J, Low M M M, et al. Orbital migration of interacting stellar mass black holes in disks around supermassive black holes. [Astrophys J](#), 2019, 878: 85
- 69 Leigh N W C, Geller A M, McKernan B, et al. On the rate of black hole binary mergers in galactic nuclei due to dynamical hardening. [Mon Not R Astron Soc](#), 2017, 474: 5672–5683
- 70 Peng P, Chen X. The last migration trap of compact objects in AGN accretion disc. [Mon Not R Astron Soc](#), 2021, 505: 1324–1333
- 71 Chen X, Zhang Z. Binaries wandering around supermassive black holes due to gravitoelectromagnetism. [Phys Rev D](#), 2022, 106: 103040
- 72 Zhang X, Chen X. The appearance of a merging binary black hole very close to a spinning supermassive black hole. [Mon Not R Astron Soc](#), 2023, 521: 2919–2929
- 73 Zhang Z F, Chen X. The dynamics and gravitational-wave signal of a binary flying closely by a Kerr supermassive black hole. [Astrophys J](#), 2024, 968: 122
- 74 Derdzinski A, Mayer L. *In situ* extreme mass ratio inspirals via subparsec formation and migration of stars in thin, gravitationally unstable AGN discs. [Mon Not R Astron Soc](#), 2023, 521: 4522–4543
- 75 Kocsis B, Yunes N, Loeb A. Observable signatures of extreme mass-ratio inspiral black hole binaries embedded in thin accretion disks. [Phys Rev D](#), 2011, 84: 024032
- 76 Yunes N, Kocsis B, Loeb A, et al. Imprint of accretion disk-induced migration on gravitational waves from extreme mass ratio inspirals. [Phys Rev Lett](#), 2011, 107: 171103
- 77 Derdzinski A M, D’Orazio D, Duffell P, et al. Probing gas disc physics with LISA: Simulations of an intermediate mass ratio inspiral in an accretion disc. [Mon Not R Astron Soc](#), 2019, 486: 2754–2765
- 78 Derdzinski A, D’Orazio D, Duffell P, et al. Evolution of gas disc-embedded intermediate mass ratio inspirals in the LISA band. [Mon Not R Astron Soc](#), 2021, 501: 3540–3557
- 79 McKernan B, Ford K E S, Bartos I, et al. Ram-pressure stripping of a kicked hill sphere: Prompt electromagnetic emission from the merger of stellar mass black holes in an agn accretion disk. [Astrophys J Lett](#), 2019, 884: L50
- 80 Tagawa H, Kimura S S, Haiman Z, et al. Observable signature of merging stellar-mass black holes in active galactic nuclei. [Astrophys J](#), 2023, 950: 13
- 81 Graham M J, Ford K E S, McKernan B, et al. Candidate electromagnetic counterpart to the binary black hole merger gravitational-wave event S190521g. [Phys Rev Lett](#), 2020, 124: 251102
- 82 Wu Y, Chen Y X, Lin D N C. Chaotic Type I migration in turbulent discs. [Mon Not R Astron Soc-Lett](#), 2024, 528: L127–L132
- 83 Barausse E. Relativistic dynamical friction in a collisional fluid. [Mon Not R Astron Soc](#), 2007, 382: 826–834

Summary for “致密天体在活动星系核吸积盘中的迁移”

Migration of compact objects in active galactic nucleus accretion disks

Peng Peng¹ & Xian Chen^{1,2*}¹ Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China² Kavli Institute of Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China* Corresponding author, E-mail: xian.chen@pku.edu.cn

The interest of studying the formation and evolution of compact objects in the accretion disks of active galactic nuclei (AGNs) dates back to the 21st century. The observational evidence of early metal enrichment in AGNs as well as the variability of AGNs motivated people then to theoretically investigate the formation and motion of compact objects in the accretion disks. More recently, the rapid progress in the observation of gravitational waves (GWs) revived the interest in the above studies. In particular, the high masses of the binary black holes (BHs) discovered by the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) and the Virgo detectors challenge the current standard model of binary BH (BBH) formation, and hence require new insights in the origin of these binaries. The accretion disk of AGNs is a favorable location for such heavy binaries to form because of the possibility of gas accretion and pairing with other BHs. Previous theoretical work on the formation and evolution of stellar-mass objects (e.g., stars, stellar-mass BHs, etc.) in AGN disks found that migration is one of the most important ingredients in the model that determines the characters of the LIGO/Virgo BBHs. Here, migration stands for the gradual change of the orbital radius of the small object due to its interaction with the surrounding gas or other stellar objects. In this review, we summarize the theoretical and observational progress related to the migration of compact objects in the accretion disks of AGNs, and point to the important problems which need to be addressed in the future. We firstly review three major types of migration which have been investigated in the literature. (1) For the compact objects whose orbits are inclined and not embedded in the disk, every time they hit the accretion disk, the orbital angular momenta are lost due to the collision. (2) Compact objects can excite density waves in the disk, which can transport angular momenta away from the compact objects via the backreaction on the objects. (3) In the case where the orbital velocity of the gas in the disk is different from the Keplerian velocity, the differential rotation between the gas and the embedded stellar object results in a hydro-dynamical friction which can also cause migration. In addition, we also briefly describe some new migration mechanisms considered recently such as thermal torque and migration driven by a third body. After reviewing the theory of migration, we further summarize the possible observational signatures related to migration. They include: (1) Metal enrichment in AGNs, induced by supernova explosion in the final evolutionary stage of an embedded star; (2) the formation of BBHs by multiple BH encounters following differential migration, and the subsequent GW radiation; (3) formation of extreme-mass-ratio or intermediate-mass-ratio inspirals when stellar-mass BHs or IMBHs finally migrate to the vicinity of the central SMBH, as well as the subsequent dynamical interaction and GW radiation in the milli-Hertz GW band. Finally, we conclude this review by highlighting the important theoretical problems and the possible directions worth exploring in the future.

gravitational wave, compact object, active galactic nucleus, accretion disk, hydrodynamicsdoi: [10.1360/TB-2024-0565](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0565)