

[Note]Zwart_2000_ApJ_528_L17

BLACK HOLE MERGERS IN THE UNIVERSE

ABSTRACT

- star cluster 内ではBHが最も重い天体なので重力緩和によって星団中心に落ちる
- これらのBBHは他の天体との相互作用でよりtightになる
- clusterの形成初期にBBHを放出した場合event rateは一桁下がる

1. INTRODUCTION

- LIGO-Iの観測が2002年に始まる
- 中性子星のmerger rate : $\sim 1.9 \times 10^{-7} h^3 \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
 - LIGO-Iで千年に数回の検出率
- 連星が超新星爆発を経てできるブラックホール連星のmerger rate (Tutukov & Yungelson 1993)
 - $2 \times 10^{-9} h^3 \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
 - 物理的不定性が大きい
- 別の可能性として密な恒星系での動的相互作用で連星を作る

2. BLACK HOLE BINARIES IN STAR CLUSTERS

- 星団がN個の星を持つときブラックホールは $\sim 6 \times 10^{-4} N$ 個
 - ブラックホールは初期質量が20-25太陽質量を超える星からできる (Maeder 1992; Portegies Zwart, Verbunt, & Ergma 1997)
 - Scalo (1986) 質量分布から20太陽質量の恒星は0.071%, 25太陽質量以上の恒星は0.045%
 - 既知のブラックホール質量 6-18太陽質量、ここでは10太陽質量と仮定する

2.1. Binary Formation and Dynamical Evolution

- 連星の場合、超新星爆発による質量損失によって連星が壊れることがある(Blaauw 1962)
 - ここでは10%程度のブラックホールが星団から放出されると見積もる
 - 星団の平均質量が0.56太陽質量程度なので、mass segregationによってブラックホールは星団中心に移動していく
 - 中心部のブラックホール密度が高まると三体相互作用によってブラックホール連星が形成され始める (Kulkarni, Hut, & McMillan 1993)
 - またブラックホールと恒星の連星は他のブラックホールとの相互作用でブラックホール連星となる
-
- N体計算で星団中のブラックホール形成をテストする
 - 粒子数2048の等質量の粒子と1%の個数の10倍重い粒子を使う
 - 初期に星団にあったブラックホールの内30%程度が連星となって放出、61%が単体まま放出、8%が星団に残る
 - 計算結果から星団あたり $10^{-4}N$ のブラックホール連星が放出されると見積もった

2.2. Characteristics of the Binary Population

- ブラックホール連星のエネルギーと軌道間隔は星団の力学特性と結びついている

$$\frac{E_b}{kT} = 3N \left(\frac{m_{\text{bh}}}{M} \right)^2 \frac{r_{\text{vir}}}{a}, \quad (2)$$

3. PRODUCTION OF GRAVITATIONAL RADIATION

- 重力波を放出している連星の合体時間 (Peter 1964)

$$t_{\text{mrg}} \approx 150 \text{ Myr} \left(\frac{M_{\odot}}{m_{\text{bh}}} \right)^3 \left(\frac{a}{R_{\odot}} \right)^4 (1 - e^2)^{7/2}. \quad (3)$$

◦

TABLE 1
CHARACTERISTIC PARAMETERS FOR DENSE STELLAR SYSTEMS

Cluster Type	$\log M$ (solar units)	$\log r_{\text{vir}}$ (pc)	$1000kT$ ($R_{\odot}$)	N_{bh}	f_{merge} (%)	MR (Myr^{-1})
Populous	4.5	-0.4	420	7.9	7.7	0.0061
Globular	5.5 ± 0.5	0.5 ± 0.3	315	150	51	0.0064
Nucleus	~ 7	≤ 0	≤ 3.3	2500	100	0.21
Zero-age globular	6.0 ± 0.5	0 ± 0.3	33	500	92	0.038

NOTE.—Overview of selected parameters for young populous clusters (Massey & Hunter 1998), globular clusters (Djorgovski & Meylan 1994), and galactic nuclei (McGinn et al. 1989). The first three columns list the cluster type, the total mass, and the virial radius. The total mass and virial radius are given as distributions with a mean and the standard deviation around the mean. The orbital separation (in solar units) for a $1000kT$ binary consisting of two $10 M_{\odot}$ black holes is given in the fourth column. The fifth and sixth columns list the expected number of black hole binaries that are formed by the cluster and the fraction of these binaries that merge within 12 Gyr (allowing ~ 3 Gyr for the formation and ejection of the binaries and assuming a 15 Gyr old universe; Jha et al. 1999). The contributions to the total black hole merger rate per star clusters per year (MR) are given in the final column. The bottom row contains estimated parameters for the zero-age population of globular clusters in the Galaxy.

3.1. Merger Rate in the Local Universe

- 他の銀河でも球状星団が同じ連星形成率を持つと仮定すると

$$\mathcal{R}_{\text{GC}} = 5.4 \times 10^{-8} h^3 \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}. \quad (6)$$

- 若い星団からの寄与

$$\mathcal{R}_{\text{YPC}} = 2.1 \times 10^{-8} h^3 \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}. \quad (7)$$

- 銀河中心でのブラックホール連星合体は無視できる
- Totalのmerger rate

$$\mathcal{R} = 7.5 \times 10^{-8} h^3 \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}. \quad (8)$$

- ただし、今回求めたブラックホール連星の排出率はかなり保守的で、球状星団の数についても形成から数十億年で銀河潮汐により50%が消失する可能性がある (Takahashi & Portegies Zwart 1999)

- これらを考慮すると

$$\mathcal{R} \sim 3 \times 10^{-7} h^3 \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}. \quad (9)$$

3.2. LIGO Observations

- LIGO-Iで検出可能な有効半径は

$$R_{\text{eff}} = 18 \text{ Mpc} \left(\frac{M_{\text{chirp}}}{M_{\odot}} \right)^{5/6} \quad (10)$$

- 中性子連星は1.4太陽質量とすると21Mpc、ブラックホール連星は10太陽質量とすると109Mpc: $1.7 h^3 \text{ yr}^{-1}$
- LIGO-IIは R_{eff} が10倍になるので1日に1個検出

4. DISCUSSION

- 銀河核や巨大な球状星団、コア崩壊を経験した球状星団からの強く束縛されて高い離心率を持つため、数Myrで合体する
 - LIGOで検出できるより前に合体している
- 最も重い球状星団がブラックホール連星合体の90%を締めると見積もっている
 - これらの星団の長い緩和時間を考えるとブラックホール連星は長い時間星団にとどまっている可能性がある
- 今回ブラックホール質量を10太陽質量と仮定したが18だとするとmerger rateは50%減る
 - しかしSNが良くなるので観測可能な距離は60%増加する
 - 全体の検出率は約3倍になる