

병합 과정 위성 헤일로 역학적 진화

이도원

연세대학교 대학원

천문우주학과

병합 과정 위성 헤일로 역학적 진화

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

이 도 원

2009년 12월 28일

이도원의 석사 학위논문을 인준함

지도교수 : 이 석 영

심사위원 : 윤 석 진

심사위원 : 김 은 혁

연세대학교 대학원

천문우주학과

2009년 12월 28일

감사의 글

연세대학교에 입학한지 벌써 6년이 되었습니다. 평생 동안 걸어갈 길이라 생각하고 달려온 6년이었지만 이제는 시동을 끄고 다시 한번 지도를 봐야 할 시간입니다.

석사 논문이 나오기 까지 많은 사람들의 도움이 없었다면 저는 아마도 지금쯤 5학기를 준비 하고 있었을 것 입니다. 저에게 많은 도움을 주셨던 분들을 이 글로 감사를 드립니다. 저의 지도 교수님이시자 뒤에서 든든하게 후원해주셨던 이석영 교수님 진심으로 감사 드립니다. 석사 과정 입학 때, 제가 무리해서 하겠다는 석사 주제를 잘 이끌어주셔서 이 자리까지 올 수 있었습니다. 앞으로 걸어갈 길은 다르지만 교수님의 열정과 여유는 기억 하겠습니다.

대학원 진학 할 때 좋은 말씀으로 다독여 주셨던 김용철 교수님 감사 드립니다. 학부생 일 때 저에게 많은 기회를 주셨던 윤석진 교수님, 부족한 저에게 연구의 길을 알려주셔서 감사합니다. 저의 석사 논문 교정을 해 주시고 좋은 말씀을 많이 주신 김은혁 박사님께 진심으로 감사 드립니다.

저의 석사 연구를 위해 한국천문연구원에서 지원해주신 천문 계산용 리눅스 클러스터가 없었다면 저의 석사 연구 진행이 매우 힘들었을 것입니다. 한국천문연구원의 김종수 박사님, 서영민 박사님께 감사 드립니다.

저를 새로운 학문의 세계로 접하게 해준 한국과학재단, 독일과학재단에 정말 감사합니다. 지난 독일에서 2달간의 생활은 저의 인생에서 잊을 수 없는 추억과 기회로 남을 것입니다. 2달 동안 저의 연구를 도와준 MPE의 Sadegh Khochfar, Durier Fabrice, Jarett L. Johnson, Volker Gaibler, Umberto Maio 모두에게 감사를 표시합니다.

대학교와 대학원 생활을 하면서 6년간 옆을 지켜왔던 저의 친구들이자 동기들인 동욱, 형덕, 지원, 경환, 나희, 혜영, 승희, 인선 모두 각자의 길에서 좋은 일만 생겼으면 합니다. 08학번 대학원 동기들 유경, 미영, 수민, 초롱, 미화, 혜원, 진 모두 석사 졸업과 새로운 출발을 축하합니다. 힘들고 지치던 석사 학위 기간에 큰 힘이 되어준 도희 형, 동현 형, 인태

형, 대우 형, 은송 형, 기범, 중수 모두 각자의 분야에서 최고 되기를 바랍니다.

지난 3년 간 많은 추억을 만들 수 있었던 GEM(윤경 누나, 주현 형, 마사토, 현진 누나, 성희 누나, 태선 형, 이나 누나, 혜원, 재현 형, 지혜, 슬희, 인태 형)의 무궁한 발전을 기원하고 세계적으로 중요한 인재로서 활약하길 소망합니다.. 석사 연구 주제부터 연구 모든 과정에서 많은 도움을 준 태선이 형에게 정말로 감사합니다. 형 덕분에 2년간의 석사 과정이 힘들었지만 좋은 연구를 할 수 있었습니다. 영국에서 형의 꿈을 이루기 바랍니다.

지난 2년 동안 제 옆에서 큰 힘이 되어준 정유경양에게 고개 숙여 감사를 표시합니다. 앞으로도 지금처럼 서로를 아끼고 의지하면서 변함없이 지냅시다.

마지막으로 저를 지금까지 키워주시고 공부하는데 아무런 부족함 없이 지원해주신 부모님께 감사 드립니다. 저의 부모님의 아낌 없는 사랑 덕분에 여기까지 올 수 있었습니다.

눈이 많이 온 2010년 1월

이도원

차 례

감사의 글	i
차례	iii
그림 차례	v
표 차례	vii
국문 요약	ix
제 1 장 서문	1
제 2 장 다체 수치모델을 이용한 병합 과정 중인 암흑 헤일로의 궤도 정보	6
제 1 절 서문	6
제 2 절 분석	8
2.1 다체 시뮬레이션	8
2.2 그룹 찾기와 암흑 헤일로의 물리적 성질	8
2.3 병합 계층 구조	10
2.4 헤일로 중심 결정 방법	13
2.5 위성 암흑 헤일로의 궤도 정보	14
제 3 절 결과	16

3.1	적색편이에 따른 위성 암흑 헤일로의 궤도 정보	16
3.2	주변 환경에 따른 위성 암흑 헤일로의 궤도 정보	27
제 4 절	토의 및 결론	34
제 3 장	병합 중인 위성 암흑 헤일로의 역학적 진화	36
제 1 절	서문	36
제 2 절	수치 모델	39
2.1	헤일로 밀도 함수	39
2.2	다체 모델 구현화	41
2.3	병합하고 있는 위성 암흑 헤일로의 궤도 정보	42
2.4	병합 시뮬레이션	47
2.5	질량 손실 함수	48
제 3 절	결과	52
3.1	헤일로 밀도 분포의 효과	52
3.2	집중도 인자의 효과	56
제 4 절	준해석적모델에 적용	59
4.1	해석적 질량 손실 계산 모델	59
4.2	해석적 계산과 다체 시뮬레이션과의 비교	62
제 5 절	토의 및 결론	64
제 4 장	정리	66
제 1 절	결론	66
제 2 절	연구의 취약점	68
제 3 절	후속 연구	68
참고 문헌		70

그림 차례

1.1 Fornax 은하단의 X선 영상	2
2.1 다양한 시간의 우주론적 시뮬레이션(Cosmological Simulation) 결과	9
2.2 병합 계층 구조(Merger Tree) 모식도	11
2.3 FOF 그룹 내의 연결 고리	12
2.4 다양한 적색편이에서 이심률(Eccentricity)의 확률 분포	18
2.5 다양한 적색편이에서 원형성 인자(Circularity)의 확률 분포	19
2.6 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 진입속도의 확률 분포	20
2.7 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 방사상 속도의 확률 분포	21
2.8 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 접선 속도의 확률 분포	22
2.9 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 진입각도의 확률 분포	23
2.10 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 중심 헤일로와 위성 헤일로의 질량비 의 확률 분포	24
2.11 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 방사상 속도와 접속 속 도의 분포	25
2.12 $z=2.0$ 인 우주	28
2.13 $z=1$ 인 우주	29
2.14 $z=0.5$ 인 우주	30
2.15 $z=0.3$ 인 우주	31
2.16 $z=0.1$ 인 우주	32

2.17 $z=0$ 인 우주	33
3.1 질량 손실 함수의 개념적 그림	37
3.2 NFW 헤일로 안정성 시험	43
3.3 Hernquist 헤일로 안정성 시험	43
3.4 이론적 궤도 요소와 계산된 궤도 요소의 비교	46
3.5 NFW-Hernquist 조합의 시뮬레이션 결과	53
3.6 Hernquist-Hernquist 조합의 시뮬레이션 결과	54
3.7 NFW-NFW 조합의 시뮬레이션 결과	55
3.8 헤일로의 밀도 분포의 조합에 따른 질량 손실 함수	57
3.9 집중도 인자(Concentration Index)에 따른 질량 손실 함수	58
3.10 다체 시뮬레이션 결과와 해석적 방법과의 평균 질량 손실 함수 비교	63

표 차례

3.1	수행된 시뮬레이션	49
3.2	사용한 헤일로 모델의 계산된 집중도 인자(Calculated Concentration Index)	50

국문 요약

은하의 형성 및 진화를 이해하기 위해서 병합 과정의 역학적 진화 이해는 필수적이다. 병합하는 헤일로 역학적 진화를 이해 하기 위해서 다양한 시기에서 발생하는 병합의 궤도 분포와 높은 질량 분해능을 사용한 병합 시뮬레이션을 이용했다. 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 분포를 보다 정확하게 계산하기 위해서 FOF+SUBFIND 알고리즘으로부터 계산된 헤일로에 역학적 마찰력을 고려한 보정법을 사용했다. 계산된 궤도 정보를 통해서 과거의 우주에서 발생하는 병합 과정이 현재의 우주에서 발생하는 병합 과정보다 훨씬 포물선에 가까운 궤도를 가지고 있음을 발견했다. 또한 Press-Schechter 질량 함수를 이용한 헤일로의 주변 환경을 이용했을 때 궤도 분포가 다르다는 사실을 발견했다.

병합하는 위성 헤일로의 질량 손실 함수는 헤일로 밀도 함수, 집중도 인자 그리고 병합 궤도에 영향을 받는다. 그 결과 질량 손실 함수로부터 위성 헤일로의 병합 시간 뿐 아니라 질량 손실 양상이 다르다는 사실을 발견했다. 수치 시뮬레이션을 준해석적모델에 적용하기 위해서 무작위로 100개의 원형성 인자를 선택해서 병합 시뮬레이션과 해석적 질량 손실 함수의 평균 질량 손실을 비교했다. 해석적 질량 손실 함수의 자유 상수 $\alpha = 0.4$ 일 때, 수치 시뮬레이션의 평균 질량 손실을 잘 맞춘다.

핵심 단어 : 방법: 다체 시뮬레이션 - 은하: 헤일로-암흑 물질: 진화 - 역학적 모델

제 1 장

서문

현재 가장 선호 되는 우주론 모델은 작은 규모에서 큰 규모를 병합을 통해서 만드는 계층적 우주 모델(Hierarchical Cosmology)이다. 은하 형성 및 진화 과정을 이해 하기 위해서 병합하고 있는 역학적 해석은 필수적이다. 헤일로간 병합 과정을 자세히 이해하고 있어야 함에도 불구하고 기존 연구는 병합 과정을 간과 하거나 매우 간단한 근사식을 이용해서 병합 과정을 묘사했다(Chandrasekhar 1943). 또한 대부분의 준해석적모델(SAM)에서 사용하는 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보 분포는 현재 우주($z=0$)에서 계산되는 궤도 정보를 사용하고 있을 뿐 아니라, 충분한 표본을 이용하지 않은 궤도 정보를 사용한다.

찬드라세카 근사방식에서 위성 헤일로는 중심 헤일로의 비리얼 반지름에 들어가는 순간 자신의 모든 질량을 잃어버린다. 이 경우 병합 시간이 매우 짧아서 병합하고 있는 위성 헤일로의 역할은 크지 않다. 그림 1.1은 Fornax 은하단의 X선 영상이다. X선 관측 결과는 찬드라세카 근사방식에서 설명하는 병합과 달리 중심 헤일로의 비리얼 반지름 내부에 병합되지 않은 위성 헤일로가 존재한다. 최근 수치 시뮬레이션 결과에 의하면 큰 규모의 헤일로 그룹에서 병합하고 있는 위성 헤일로는 상당히 오랜 시간 생존한다는 사실이 밝혀졌다(Klypin et al. 1998; Moore et al. 1999a). 위성 헤일로의 병합 시간이 길어지게 되면 중심 헤일로와 상호 작용을 하기 때문에 병합하고 있는 위성 헤일로의 역할은 무시 할 수 없을 뿐 아니라 은하 형성 및 진화를 이해 하기 위한 매우 중요한 물리 현상이다. 찬드라세



그림 1.1. Fornax 은하단의 X선 영상

카 근사방식과 달리 현재 이해하고 있는 헤일로간 병합 과정은 위성 헤일로가 중심 헤일로의 중력권에서 운동하면서 자신의 각운동량을 역학적 마찰력(Dynamical Friction)에 의해 점차 적으로 잃어버리는 현상이다. 관측 결과 역시 완전 하지는 않지만 현재 이해하고 있는 병합 과정과 일치하고 있다(Chiba 2002; Dalal & Kochanek 2002; Metcalf & Madau 2001). 은하 규모에서 발견되는 부헤일로(Subhalo)들의 경우 부헤일로의 분포와 특성을 자세하게 이해하고 있다(Ghigna et al. 1998; Tormen, Diaferio & Syer 1998; Mooer et al. 1999b; van den Bosch et al. 1999; Zhang et al 2002; Gnedin 2003a,b; Benson et al. 2004; Diemand, Moore & Stadel 2004; Gao et al. 2004).

하지만 부헤일로의 궤도 정보에 대한 연구는 아직 부족하다. 지금까지 사용해 온 부헤일로의 궤도 정보는 모든 구조가 완성된 시점($z=0$)의 값이다(Ghigna et al 1998). 이 경우 우리가 사용하는 궤도 정보는 현재의 우주와 과거의 우주가 같은 궤도 분포를 가지게 되는 문제와 확실한 병합 후보를 이용하지 않았기 때문에 균일한 표본을 사용할 수 없는 문제에 봉착한다. 이런 문제점을 해결 하기 위해서 현재 시점의 정보만을 이용하지 않고 수치 시뮬레이션을 통해서 각각의 헤일로들의 부모 헤일로들을 찾은 후, 다양한 시간에 걸쳐 연결된 헤일로 연결 고리들을 이용해서 실제로 병합하는 헤일로를 찾아서 궤도 정보를 사용한다(Tormen 1997; Vitvitska et al. 2002; Khochfar & Burkert 2006; Benson 2005). 기존 연구를 통해서 부헤일로의 궤도 정보를 보다 사실적이고 정확히 도출하는 방법을 고안했지만 다양한 시기에 발생하는 부헤일로의 궤도 정보는 아직 까지 연구 되어 있지 않다. Dekel(2009)은 과거의 우주에서 현재의 우주보다 질량이 매우 큰 은하와 질량이 작은 은하 모두 차가운 가스가 구조적인 움직임으로 별생성의 재료를 보충 해준다는 결과는 과거의 우주와 현재의 우주의 역학적 양태가 다르다는 사실을 말해 주고 있다.

대부분의 준해석적모델에서 사용하는 병합 계층 구조(Merger Tree)는 크게 두 가지로 Monte Carlo 방법을 통해 무작위로 만드는 방법(Somerville & Kolatt 1999; Sheth & Lemson 1999; Cole et al. 2000)과 수치 시뮬레이션 결과로부터 만드는 방법(Kauffmann, White & Guiderdoni 1993)이다. 이후 병합 계층 구조로부터 역학적 모델을 만드는 과정은 현재 부헤일로의 초기 궤도 정보 분포를 사용한다. 보다 사실적인 은하 형성 및 진화를 이해하기 위해서는 병합 계층 구조 뿐 아니라 부헤일로의 초기 궤도 정보 분포가 중요하

다. 부헤일로의 초기 궤도 정보의 경우 현재 우주에서 발견되는 궤도 정보만을 이용하기 때문에 그 한계가 있다.

수치 시뮬레이션내에 발견되는 병합의 경우 위성 헤일로와 중심 헤일로간 위치가 균일한 분포를 가지고 있지 않다. 이런 불균일한 표본에서 의미 있는 궤도 정보를 얻기 위해서, 2체 운동이라 가정하고 각 헤일로의 궤도 정보를 얻는다(Vitvitska et al. 2002; Benson 2005). 이 경우 균일한 표본을 만들기 위해서 수치 시뮬레이션에서 구한 위성 헤일로의 위치를 중심 헤일로의 비리얼 반지름(Virial Radius)에 위치 할 때 위치와 속도로 보정을 한다. Benson(2005)의 경우 궤도 계산을 통해서 보정이 이루어진다. 하지만 보정하는 과정에서 역학적 마찰력(Dynamical Friction)을 고려하지 않아서 보정된 위성 헤일로의 위치와 속도는 위성 헤일로의 초기 분포를 연구하는데 있어서 부정확한 결과를 준다.

부헤일로의 초기 궤도 정보 분포 연구와 더불어 중요한 부분은 실제 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 변화를 연구하는 것이다. 많은 연구에서 사용하는 우주론적 수치 시뮬레이션을 통해 각 헤일로 내부의 역학적 진화를 연구하기 위해서 매우 좋은 질량 분해능을 필요로 한다. 하지만 현재의 컴퓨터 자원으로는 우주론적 수치 시뮬레이션을 통해서 병합하고 있는 헤일로의 역학적 진화를 자세히 연구 하기 불가능하기 때문에 헤일로 모델을 이용한 수치 시뮬레이션을 통해서 헤일로의 역학적 진화 모습을 연구를 대치한다. 이 경우 조석력(Tidal Force), 중력에 의한 충격파(Gravitational Shock) 그리고 역학적 마찰력과 같은 현상이 헤일로 내부 뿐만 아니라 전체 병합 과정 전체에 매우 큰 영향을 준다(Huang & Carlberg 1997; Naab, Burkert & Hernquist 1999; Velaázquez & White 1990; Moore et al. 1996; Moore, Lake & Katz 1998; Mayer et al. 2001a,b; Zhang et al. 2002).

준해석적모델에서 헤일로의 역학적 진화는 매우 단순한 가정을 사용한다. 위성 헤일로의 역학적 진화는 고려하지 않은채 중심 헤일로와 위성 헤일로의 질량비에 의해 변하는 역학적 마찰력에 의해 계산된 병합 시간 만을 이용한다. 기존 연구에서 병합하고 있는 지역적 효과(조석력, 중력에 의한 충격파, 역학적 마찰력)가 전체 계에 큰 영향을 준다는 사실이 알려져 있다. 만약 은하 형성 및 진화 모델에서 각 헤일로의 역학적 성질이 반영되지 않을 경우 우리가 이해하는 우주의 모습은 매우 부정확할 가능성이 높다.

보다 사실적인 은하 형성 및 진화 모델을 사용하기 위해서 우주 거대 구조의 이해 뿐만

아니라 헤일로-헤일로 간 병합 과정을 이해해야 한다. 수치 시뮬레이션을 통해서 현재의 우주에서 발견되는 대부분의 궤도가 이심률 $e \approx 0.7$ 에 해당하는 궤도를 갖는다는 사실이 수치적 결과로 알려졌다(Tormen 1997; Ghigna et al. 1998). 대부분의 해석적모델에서 도 이 궤도를 이용하여 연구가 진행되었다. 기존 연구에서 위성 헤일로의 역학적 진화를 연구하는데 지역적 물리 법칙을 도입한 방법을 사용하고 있다(Taylor & Babul 2001, 2004; Gnedin 2003; Taffoni et al. 2003; Zentner et al. 2005; Kimm et al. 2009). 하지만 이런 모델의 경우 단순화시킨 지역적 효과(조석력, 중력에 의한 충격파, 역학적 마찰력)를 사용하거나 찬드라세카 근사방식으로 계산된 병합 시간을 사용하고 있기 때문에 그 한계가 있다. 이런 한계를 극복하고자 Boylan-Kolchin(2008)은 찬드라세카 근사방식으로 계산된 병합 시간이 아닌 수치 시뮬레이션을 통해서 얻은 병합 시간을 사용하였다. 기존 연구의 많은 개선에도 불구하고 아직 까지 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 진화를 기술하는 모델은 많은 한계를 가지고 있다.

본 연구의 목표는 병합 과정의 위성 헤일로의 역학적 성질을 연구 함으로써 기존 연구에서 간과해온 병합 과정을 기술하고 준해석적모델에 적용 할 수 있는 방법을 제시하는 것이다. 이를 위해서 수치 시뮬레이션을 이용해서 다양한 시기에서 발생하는 병합 궤도 정보를 연구하고, 다양한 주변환경(질량비, 궤도 정보, 헤일로 밀도 함수)에서 발생하는 병합하는 위성 헤일로의 역학적 진화모습을 확인한 후 수치 시뮬레이션으로부터 얻은 결과를 해석적모델에 적용시키는 방법을 고안했다.

2장에서 다양한 시기에 발생하는 병합 과정의 궤도 정보를 계산하는 방법과 결과를 기술 하고, 3장에서 다양한 주변환경에서 발생하는 병합을 수치 시뮬레이션을 이용해서 위성 헤일로의 역학적 진화모습과 이를 해석적모델에 적용시키는 방법을 기술한다. 마지막 4장에는 본 연구의 결론, 보안할 점 그리고 후속 연구에 대해서 설명한다.

제 2 장

다체 수치모델을 이용한 병합 과정 중인 암흑 헤일로에의 궤도 정보

제 1 절 서문

현재 가장 선호 되는 우주론 모델은 암흑 물질이 병합을 걸쳐서 작은 규모에서 큰 규모를 만드는 계층적 우주 모델(Hierarchical Cosmology)이다. 최근 수치 시뮬레이션의 결과는 큰 규모의 헤일로 그룹에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 생존 시간이 과거 찬드라 세카 근사방식(Chandrasekhar Formalism)에서 설명하는 병합 시간보다 상당히 길 다라는 사실을 말해주고 있다(Klypin et al. 1998; Moore et al. 1999a). 병합하고 있는 위성 헤일로는 중심 헤일로의 중력권에 운동하면서 자신의 각운동량은 역학적 마찰력(Dynamical Friction)에 의해 점차 적으로 잃어버린다. 이와 같은 중심 헤일로와 병합하는 위성 헤일로는 위성 은하를 형성하면서 주로 우리 은하가 위치 하는 국부 은하군과 같은 형태로 발견 된다.

이런 부헤일로(Subhalo)들은 아직 관측 결과적으로 완벽하지 않지만 부헤일로의 여러 성질들이 관측적인 결과와 수치 시뮬레이션과 같은 이론적인 결과와 일치하고 있다(Chiba 2002; Dalal & Kochanek 2002; Metcalf & Madau 2001). 또한 기존 연구에 의

해서 나선 은하의 부헤일로 분포와 성질들이 자세하게 밝혀졌다(Ghigna et al. 1998; Torment, Diaferio & Syer 1998; Mooer et al. 1999b; van den Bosch et al. 1999; Zhang et al. 2002; Gnedin 2003a,b; Benson et al. 2004; Diemand, Moore & Stadel 2004; Gao et al. 2004). 하지만 기존 연구에서 사용하는 부헤일로의 궤도 정보는 시뮬레이션의 역학적 진화의 마지막 단계인 현재의 우주에서 병합이 예상되는 헤일로 표본에서 구하였다(Ghigna et al. 1998). 반면에 Tormen(1997), Vitvitska et al.(2002), Khochfar & Burkert(2006) 그리고 Benson(2005) 그룹은 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보를 구하기 위해서 수치 시뮬레이션에서 각 헤일로들의 과거 위치를 찾은 후 실제 병합 현상이 발생하는 헤일로로 사용함으로써 좀 더 사실적인 궤도 정보를 사용했다.

병합하고 있는 위성 헤일로의 초기 궤도 정보 분포는 은하 형성 및 진화 연구에 있어서 매우 중요한 연구이다. 은하 형성 및 진화 연구에서 헤일로의 성질을 연구하는데 있어서 가장 중요하게 작용하는 RAM 압력에 의한 가스 손실, 조석력에 의한 질량 손실, 중력과 등과 같은 물리 현상은 초기 궤도 정보 분포에 민감하게 반응한다. 좀 더 사실적인 병합하는 위성 헤일로의 초기 궤도 정보 분포가 알려지면 이를 통해 보다 정확한 병합 비율, 병합을 통한 형태 변화 비율을 도출할 수 있다. 기존의 준해석적모델은 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 성질 들을 과거 찬드라세카 근사방식에서 설명하는 것 보다 정확하게 예측 했다(Benson 2002; Taylor & Babul 2001, 2004). 하지만 이 경우 초기 조건이 완전하게 계산된 상황과 고립된 계를 사용했기 때문에 그 한계가 있다.

본 연구는 Benson(2005)가 수행한 방법과 유사한 방법으로 다양한 적색편이에서 위성 헤일로의 궤도 정보 분포를 확률적인 값으로 도출 하고자 한다. 최소한의 통계학 적 신뢰도를 만족 시키기 위해서 512^3 개의 입자를 사용한 수치 시뮬레이션의 결과를 사용한다. 기존 연구보다 좀 더 사실적인 결과를 도출 하기 위해서 역학적 마찰력을 도입하여 위성 헤일로의 초기 위치와 속도를 보정하였다. 본 연구의 목적은 병합하고 있는 위성 헤일로의 병합 궤도 정보를 시간에 따른 경향성, 주변 환경에 따른 경향성을 밝히고 다양한 궤도 정보 확률 분포를 시간에 따라 그 분포를 얻는 것이다.

제 2 절 분석

2.1 다체 시뮬레이션

본 연구는 독일 MPE(Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik)의 Durier Fabrice 에 의해 GADGET2(Springel 2005) 코드를 통해 수행된 시뮬레이션 결과를 사용하였다. 시뮬레이션은 독일 Rechenzentrum Garching에 위치한 200여 개의 중앙처리장치(CPU)로 구성된 SFC 병렬 컴퓨터 클러스터를 사용했다. 수행된 시뮬레이션은 차가운 암흑 물질(Λ CDM)로 구성된 우주 모델을 가정하였고, 바리온 입자 없이 암흑 물질 입자로만 구성되어 있다. 시뮬레이션 상자의 크기는 정육면체의 한 변이 $100 \text{ Mpc } h^{-1}$ 이고, 사용된 입자의 수는 512^3 개이며, 시뮬레이션을 구성하는 입자의 질량은 $0.06 \times 10^{10} M_{\odot}$ 이다. 사용된 우주 상수는 $\Omega_{\Lambda} = 0.7, \Omega_0 = 0.3, \sigma_8 = 0.9, n = 1.0, h = 0.7$ 이다. 본 연구의 수치 시뮬레이션은 약 2억 년 간격으로 입자들의 위치, 속도 그리고 질량과 같은 입자들의 정보가 담긴 64개의 결과물을 만든다. 시뮬레이션으로부터 나오는 결과물에 대해서 모든 분석이 진행되었다. 적색편이 2 이상에서는 병합 횟수가 많지 않기 때문에 통계적으로 의미 있는 결과를 얻기 위해서 적색편이 2 이하의 결과물을 사용했다.

2.2 그룹 찾기와 암흑 헤일로 물리적 성질

공간상에 분포한 입자들을 friends-of-friends(Davis et al. 1985, FOF) 알고리즘을 사용해서 최소 1600개 입자($\simeq 1 \times 10^{12} M_{\odot}$)가 구성될 때 하나의 FOF 그룹을 정의한다. 이 때 사용하는 연결 길이(Linking Length)는 $b=0.16$ 이다. FOF 알고리즘을 사용해서 수치 시뮬레이션에서 입자들의 그룹을 정의하는 방법은 속도 정보를 사용하지 않은 채 단순히 위치 정보만을 사용해서 지정학 적으로 연결된 입자들을 사용한다. 이후 모든 FOF 그룹에 대해서 SUBFIND 알고리즘(Springel et al. 2001a)을 사용해서 FOF 그룹 내에 속박된 부헤일로를 찾는다. SUBFIND 알고리즘은 FOF 그룹을 구성하는 입자들의 밀도를 계산한 후 초과 밀도 지역을 찾고 밀도 분포의 안장점을 찾는다. 이후 반복적인 계산을 통해서 중력 적으로 더 이상 속박되어 있지 않다면 입자들이 없을 때까지 각 입자들의 총 에너지를 계산한 다음 최소 10개의 입자로 구성된 헤일로를 부헤일로라고 정의한다.

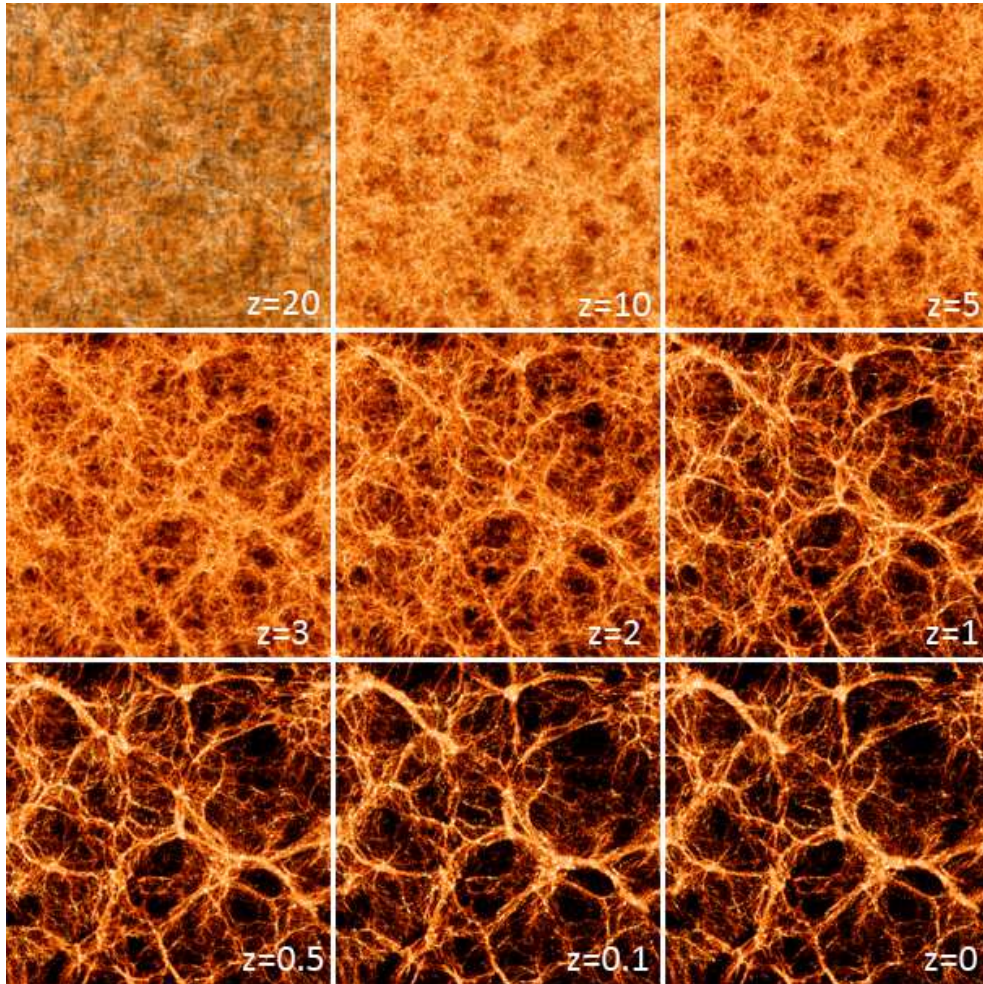


그림 2.1. 다양한 시간의 우주론적 시뮬레이션(Cosmological Simulation) 결과

적색편이 20부터 0까지 시뮬레이션 내의 우주 모습을 보여주고 있다. 색이 의미하는 것은 시뮬레이션 내의 입자의 밀도를 의미한다. 색 체계는 밀도의 로그 값으로 높은 밀도일 수록 노란색을 사용하고 낮은 밀도일 수록 검은색을 사용한다.

수치 시뮬레이션내의 정의된 부헤일로 질량을 정의 하기 위해 가장 손쉬운 방법은 FOF 그룹과 SUBFIND 그룹을 이루는 입자들의 질량의 총 합을 사용하는 M_{FOF} , M_{SUBFIND} 이다. 이 경우 헤일로가 완전히 안정된 계가 아닐 경우 헤일로의 질량을 대표하기에 무리가 있다. 이를 위해서 초과 밀도상수 Δ 를 도입해서 헤일로의 밀도 분포중 초과 밀도 상수를 넘지 않는 곳까지 질량을 헤일로 질량의 대표값 M_{Δ} 로 사용했다. 본 연구에서는 초과 밀도 상수 $\Delta = 200$ 에 해당하는 M_{200} 값을 헤일로의 대표 질량으로 정의했다. 헤일로의 반지름 역시 헤일로의 밀도 분포가 초과 밀도 상수 $\Delta = 200$ 인 곳의 반지름 R_{200} 을 사용했다.

2.3 병합 계층 구조

병합 계층 구조(Merger Tree)는 다양한 시간에 걸쳐서 생성된 결과 파일 내에 FOF와 SUBFIND 코드로부터 찾아진 헤일로들 간의 연결 고리를 찾아줌으로써 다양한 시간에서 헤일로의 병합 과정을 알려준다(그림 2.2).

시뮬레이션을 구성하는 입자들은 고유 번호를 가지고 있고, 이 고유 번호는 전체 시뮬레이션동안 변하지 않는다. 특정한 시점에서 구한 결과물에서 FOF 알고리즘과 SUBFIND 알고리즘에 의해 정의된 헤일로들의 입자들의 고유 번호를 시간적으로 다음 단계의 결과 내의 정의된 헤일로들의 입자들의 고유 번호와 비교 함으로써 같은 입자들로 이루어진 헤일로의 여부를 판단 할 수 있다. 여기서 현재 단계($t = t_0$)의 헤일로의 60% 입자를 다음 단계($t = t_0 + \Delta t$) 헤일로가 가지고 있을 경우 연결 고리를 만든다.

하나의 중심 헤일로는 많은 수의 위성 헤일로를 가지고 있다. 또한 위성 헤일로들 중 규모가 큰 위성 헤일로는 자신의 위성 헤일로를 가지고 있다. SUBFIND 알고리즘에 의해 정의된 헤일로는 각 헤일로를 구분하지만, FOF 알고리즘에 의해 정의된 헤일로는 많은 수의 부헤일로를 가지고 있다. 많은 헤일로 중에서 중심 헤일로와 위성 헤일로를 구분하는 작업은 FOF 그룹 내의 헤일로들의 계층적 구조를 보여준다. 그림 2.3은 시뮬레이션 내의 특정 FOF 그룹을 보여준다. 회색 점은 FOF 그룹을 구성하는 입자들을 의미한다. 검은 색 원은 FOF 그룹의 비리얼 반지름을 의미한다. 파란색, 녹색 그리고 주황색 원은 FOF 그룹 내의 SUBFIND로부터 정의된 헤일로 들의 비리얼 반지름을 의미한다. 파란색 원은

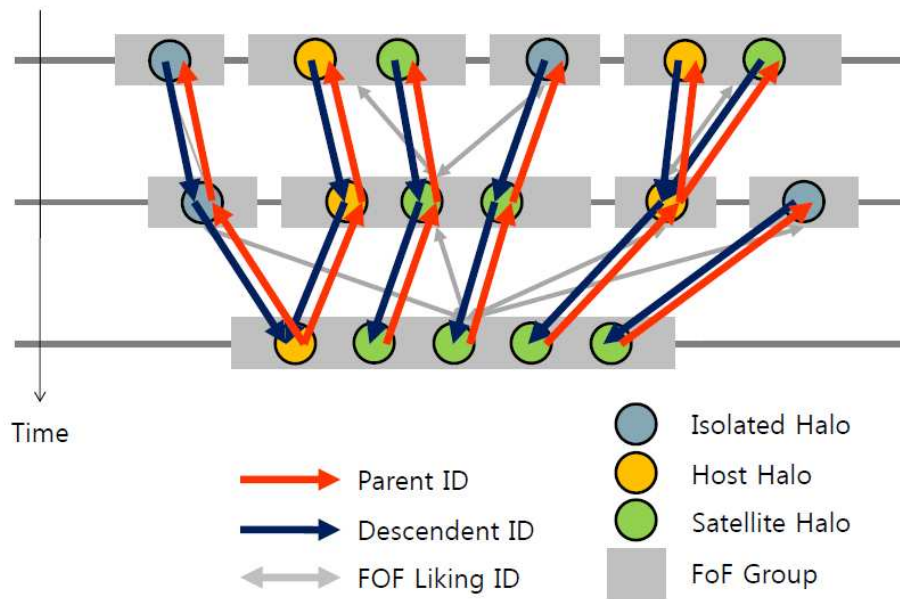


그림 2.2. 병합 계층 구조(Merger Tree) 모식도

병합 계층 구조에서 다양한 시간에 존재하는 헤일로의 연결 고리를 보여주고 있다. 빨간색 화살표는 한 시점의 헤일로의 부모 헤일로를 의미하고, 파란색 화살표는 자식 헤일로를 의미한다. 모든 헤일로는 FOF 그룹에 속해 있으며, 각 FOF 그룹 역시 서로 다른 시간의 FOF 그룹과 연결 시킨다.

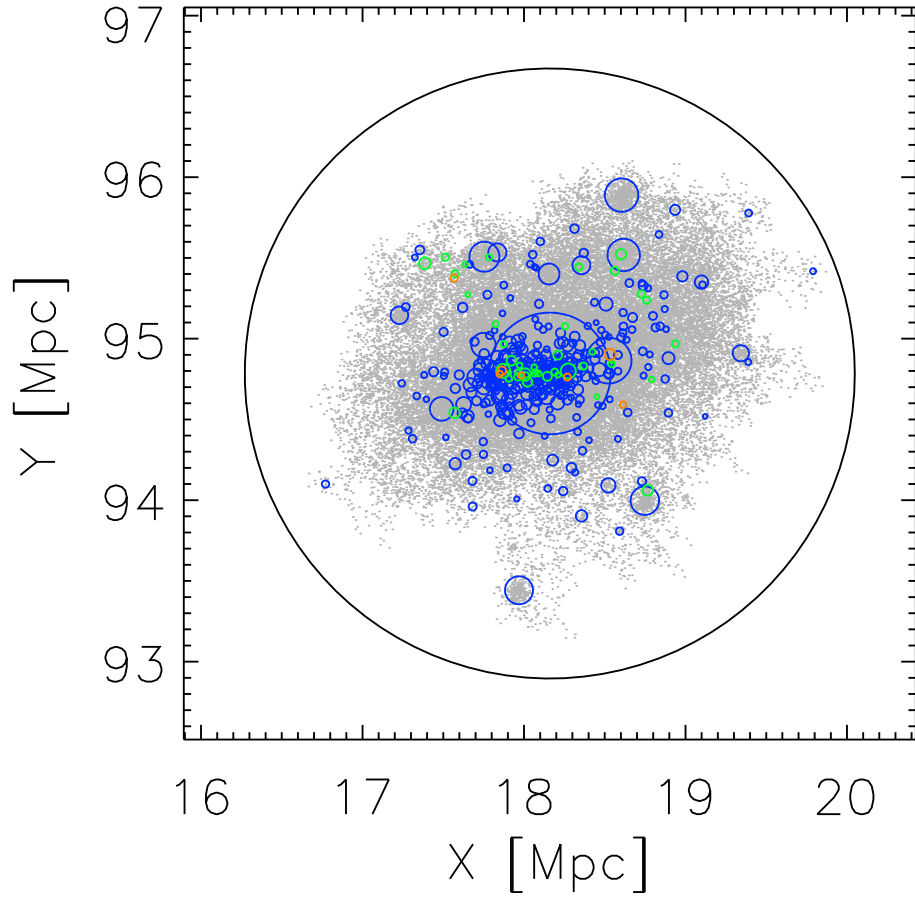


그림 2.3. FOF 그룹 내의 연결 고리

FOF 그룹 내의 각 헤일로에 연결 고리를 보여준다. 회색 점은 FOF 그룹을 구성하는 입자이다. 검은색 원은 FOF 그룹의 비리얼 반지름을, 파란색, 녹색 그리고 주황색 원은 SUBFIND로부터 정의된 비리얼 반지름을 의미 한다. 파란색 원은 FOF 그룹의 위성 헤일로를, 녹색은 파란색 헤일로를 중심 헤일로를 가지는 위성 헤일로를, 주황색은 녹색 헤일로를 중심 헤일로를 가지는 위성 헤일로를 의미한다.

FOF 그룹의 위성 헤일로들, 녹색은 파란색 헤일로들 중심 헤일로들 가지는 위성 헤일로들, 주황색은 녹색 헤일로들 중심 헤일로들 가지는 위성 헤일로들을 의미한다.

2.4 헤일로 중심 결정 방법

병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보를 측정하기 위해서는 각 헤일로들의 대표 위치와 대표 속도를 설정해야 한다. 가장 간단한 방법은 헤일로의 질량 중심(Center-of-Mass, COM)과 속도 중심(Center-of-Velocity, COV)을 사용하는 것이다. 헤일로의 형태가 구형이라면 질량 중심과 속도 중심은 의미 있는 값을 가진다. 하지만 실제 시뮬레이션에서 발견되는 헤일로는 대부분 구형의 모습을 가지지 않는다. 병합이 진행되고 있는 헤일로의 경우 구형의 모습뿐 아니라 중심 헤일로와 위성 헤일로 간의 물질 교환이 이루어지면서 아령 모습과 같은 형태를 갖는 경우가 있다. 이 경우 물질 교환이 이루어지는 조석력 꼬리 영향으로 질량 중심과 속도 중심을 이용할 경우 실제 헤일로의 대표 위치와 대표 속도를 알려주지 못한다. 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보를 측정하기 위해서는 의미 있는 대표 위치와 대표 속도가 필요하기 때문에 질량 중심과 속도 중심을 대체할 만한 방법을 구현해야 한다. 이를 위해서 헤일로를 구성하는 입자들 중 중력 에너지가 가장 작은 입자를 찾아서 이 입자의 위치와 속도를 헤일로의 대표 위치와 대표 속도로 사용하는 방법을 선택했다.

중력 에너지가 가장 작은 입자를 찾아내기 위해서 Benson(2005)이 수행한 최대 속박 입자 위치법(Most Bound Particle Centering)을 사용했다. 이 방법은 각 입자들의 중력 에너지를 계산할 때, 속도 정보를 이용하는데 특정 입자의 중력 에너지 ϵ 은 아래와 같다.

$$\epsilon_i = \sum_{j=0, i \neq j}^n -\frac{1}{|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j|} \quad (2.1)$$

식 2.1을 통해서 ϵ 의 값이 제일 작은 위치의 위치와 속도를 입자가 속한 헤일로의 대표 위치와 대표 속도로 정의한다.

일반적으로 이완된 헤일로의 경우 질량 중심과 속도 중심을 이용한 방법과 최대 속

박 입자 위치법을 이용한 방법의 간의 차이는 대표 위치의 경우 큰 차이를 보이지 않지만, 병합하고 있는 헤일로인 경우 두 대표 속도는 500 km s^{-1} 이상의 차이를 보인다(Benson 2005). 이 속도 차이는 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 측정에 많은 차이를 발생하기 때문에 좀 더 사실적인 최대 속박 입자 위치법으로부터 얻은 대표 속도를 사용했다.

2.5 위성 암흑 헤일로의 궤도 정보

병합하고 있는 헤일로를 찾는 과정은 일차 적으로 병합 계층 구조를 이용하여 구한다. 병합하고 있는 헤일로에서 위성 헤일로의 궤도 정보는 특정 시간에 병합 과정이라 정의된 헤일로들로부터 질량이 큰 헤일로를 중심 헤일로, 이보다 질량이 작은 헤일로를 위성 헤일로라 명명하고 위성 헤일로의 위치, 속도를 이용해서 계산된다.

실제 병합하고 있는 헤일로의 궤도 정보를 계산하기 위해서 병합 계층 구조로부터 헤일로의 연결 고리를 이용해야 한다. 만약 $t = t_0$ 일 때 시뮬레이션 결과의 헤일로가 $t = t_0 + \Delta t$ 일 때 시뮬레이션 결과에서 병합이 될 경우 궤도 정보 계산을 수행한다. 이때 위성 헤일로의 병합 궤도를 구하는 공식은 아래와 같다(Benson 2006).

단위 질량 각운동량(Specific Angular Momentum):

$$J = V_\theta \quad (2.2)$$

이심률(Eccentricity):

$$e = \frac{V_\theta^2}{f_2} \sqrt{\left(1 - \frac{f_2}{V_\theta^2}\right)^2 + \left(\frac{V_r}{V_\theta}\right)^2} \quad (2.3)$$

원형성 인자(Circularity):

$$\eta = V_\theta \sqrt{\frac{2f_2 - V_r^2 - V_\theta^2}{2f_2 - 1}} \quad (2.4)$$

장축 길이(Semi-Major Axis Length):

$$a = \frac{f_2}{2f_2 - V_r^2 - V_\theta^2} \quad (2.5)$$

근지점 거리(Pericentric Distance):

$$r_{\text{peri}} = \left[\frac{f_2}{V_\theta^2} + \sqrt{\left(1 - \frac{f_2}{V_\theta^2}\right)^2 + \left(\frac{V_r}{V_\theta}\right)^2} \right]^{-1} \quad (2.6)$$

원지점 거리(Apocentric Distance):

$$r_{\text{apo}} = \left[\frac{f_2}{V_\theta^2} - \sqrt{\left(1 - \frac{f_2}{V_\theta^2}\right)^2 + \left(\frac{V_r}{V_\theta}\right)^2} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

여기서 사용되는 속도는 중심 헤일로의 비리얼 속도로, 거리는 중심 헤일로의 비리얼 반지름으로 잰 값들이다.

대부분의 준해석모델에서는 병합하고 있는 위성 헤일로의 위치가 중심 헤일로의 비리얼 반지름에 위치에서 정의한다. Benson의 궤도 요소 공식도 위성 헤일로가 중심 헤일로의 비리얼 반지름에 위치 했을 때를 기준으로 한다. 준해석모델과 동일한 정의를 사용하기 위해서 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보는 위성 헤일로의 위치가 중심 헤일로의 비리얼 반지름에 위치했을 때의 위치와 속도를 이용해야 한다. 우주론적 시뮬레이션의 결과는 불 연속적인 특정 시기의 우주 모습이기 때문에, 병합하고 있는 위성 헤일로의 위치는 정확하게 중심 헤일로의 비리얼 반지름에 위치하지 않는다. 이와 같은 문제를 극복하기 위해서 위성 헤일로의 위치를 보정해주어야 한다.

위성 헤일로의 위치 보정은 우주론적 시뮬레이션으로부터 구한 결과를 이용한 여분의 궤도 계산을 통해 이루어진다. 위성 헤일로의 위치가 중심 헤일로의 비리얼 반지름 바깥 영역에 위치할 경우, 위성 헤일로의 위치는 단순히 중심 헤일로의 중력에 의한 값을 계산하여 보정 된다. 반면에 위성 헤일로의 위치가 중심 헤일로의 비리얼 반지름 안쪽 영역에

위치 할 경우에는 위치 보정 방법은 다양한 물리적 환경을 고려해야 한다.

위성 헤일로 위치 보정 시 역학적 마찰력을 고려해야 한다. 과거 Benson이 계산한 방법은 역학적 마찰력을 고려 하지 않고 단순히 시간을 거슬러 올라가는 궤도 계산 방법을 본 연구에서 독자적으로 사용했다. 이 경우 반복 적인 계산을 수행하여도 위성 헤일로의 위치가 중심 헤일로의 비리얼 반지름에 도달하지 못하는 경우가 존재한다. 이는 위성 헤일로가 중심 헤일로를 향해 들어오는 과정에서 자신의 각운동량을 잃어버리는데, 시간을 거슬러 궤도를 계산 할 때 역학적 마찰력을 고려하지 않으면 잃어버린 각운동량이 회복 되지 않기 때문이다. 본 연구에서 는 Benson이 수행했던 병합하고 있는 헤일로의 궤도 정보를 계산하고 위성 헤일로의 위치를 보정하는 과정에서 역학적 마찰력 효과를 도입함으로써 보다 정밀한 병합하는 헤일로의 궤도를 구했다.

제 3 절 결과

3.1 적색편이에 따른 위성 암흑 헤일로의 궤도 정보

적색편이 $z=3, 1, 0.5, 0.3, 0.1, 0.0$ 에 해당하는 우주에서 발생하는 모든 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보를 계산(식 2.2-식 2.7) 하고 각 궤도 정보의 분포를 조사하였다.

그림 2.4는 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 이심률의 확률 분포이다. 적색편이 $z > 1$ 인 우주에서 는 이심률이 1보다 큰 궤도를 가지고 있고, 이심률이 1보다 작은 궤도의 경우 과거의 우주에서 포물선에 가까운 궤도의 확률이 현재의 우주의 표본보다 2배 이상 작다.

그림 2.5는 다양한 적색편이에서 위성 헤일로의 궤도 정보중 원형성 인자의 확률 분포를 보여준다. 원형성 인자는 병합하고 있는 위성 헤일로의 각운동량 값을 말해주는 값(Lecey & Cole 1993)으로써 $\eta = L/L_c$ 이다. 만약 위성 헤일로의 궤도가 원 궤도를 가질 때, 원형성 인자 η 는 최대값($\eta = 1$)을 갖는다. 원형성 인자 η 는 전체적으로 서로 다른 적색편이에서 비슷한 확률 분포를 보인다. 하지만 원형성 인자가 0.8보다 큰 경우(이심률 $e=0.6$ 보다 작은 궤도, 즉, 매우 원에 가까운 경우에 해당함) 확률 분포 확인해보면 현재

의 우주에서 과거의 우주보다 2배 이상의 확률을 갖는다. 이는 현재의 우주에서 발생하는 병합 과정이 과거의 우주에서 발생하는 병합 과정보다 원 궤도에 가까운 병합이 상대적으로 많다는 사실을 말해주고 있다.

그림 2.6, 2.7, 2.8은 병합하고 있는 위성 헤일로로의 진입 속도, 방사상 속도 성분 그리고 접선 속도 성분의 확률 분포이다. 병합하고 있는 위성 헤일로로의 진입 속도는 적색편이가 1보다 큰 우주($z > 1$)와 적색편이가 1보다 작은 우주($z < 1$)에서 매우 다른 확률 분포를 보여주고 있다. 과거의 우주에서는 위성 헤일로로의 진입 속도가 중심 헤일로로의 비리얼 속도 뿐만 아니라 중심 헤일로로의 탈출 속도($V_{esc} = \sqrt{2} \times GM_{200}/R_{200}$)보다 월등히 빠르게 진입하면서 병합된다. 과거의 우주에서 질량이 매우 큰 은하와 질량이 작은 은하 모두 차가운 가스의 구조적인 움직임으로 중심 헤일로로 별 생성에 필요한 재료를 보충해주고 있다는 결과(Dekel et al. 2009)와 유사한 내용을 말하고 있다. 현재의 우주에서 병합 과정에서 위성 헤일로로 진입 속도의 확률 분포는 중심 헤일로로 비리얼 속도 부근에서 극대값을 가진다. 이는 대부분의 준해석적모델에서 사용하는 가정과 부합하는 결과이다.

그림 2.9는 병합하고 있는 위성 헤일로로 진입 각도($\phi = \cos^{-1}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}/(|\mathbf{r}| \cdot |\mathbf{v}|))$)의 확률 분포이다. 위성 헤일로로 진입 각도는 각운동량과 매우 밀접한 관계를 가진다. 진입 각도가 90° 에 가까울수록 원 궤도에 가까운 궤도를 가지고, 0° 에 가까울수록 이심률이 큰 궤도를 가진다. 모든 적색편이에서 위성 헤일로로 진입 각도의 분포는 약 50° 에서 극대값을 갖는다. 하지만 과거의 우주의 경우 진입 각도가 작은 쪽으로 치우친 분포를 가지는 반면에 현재의 우주에서는 진입 각도가 큰 쪽으로 치우친 분포를 가지고 있다. 원 궤도에 가까운 진입 궤도는 과거의 우주보다 현재의 우주에서 발견되는 확률이 2배 이상 높은 확률로 발견된다.

그림 2.10은 위성 헤일로와 중심 헤일로 질량비의 확률 분포이다. 현재 통용되는 우주론 모델에서 작은 규모의 헤일로들이 병합을 통해서 더 큰 구조를 만들어 간다. 과거 우주의 경우 큰 규모가 형성되어 있지 않기 때문에 주로 규모가 큰 병합이 발생한다. 시간이 지날수록 우주에 분포하는 구조가 성장함에 따라 규모가 큰 병합보다는 규모가 작은 병합이 발생한다. 적색편이 $z=3$ 인 우주에서는 질량비 100:1인 병합이 가장 빈번하게 발생하며 규모가 큰 병합쪽으로 치우친 확률 분포를 갖는다. 현재의 우주의 경우 규모가 큰 병합

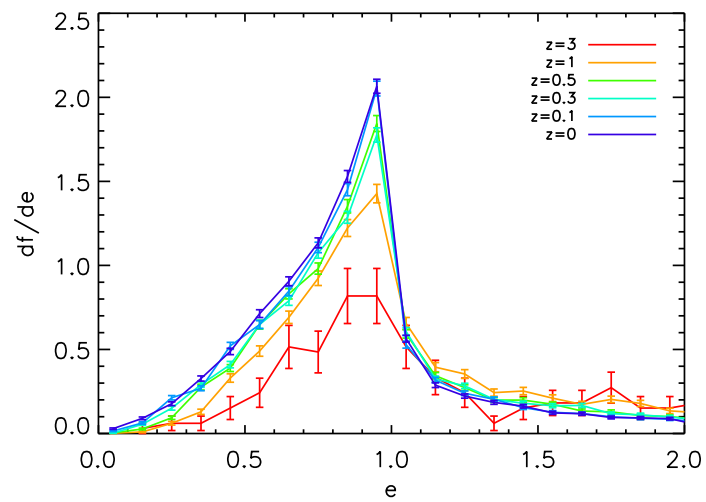


그림 2.4. 다양한 적색편이에서 이심률(Eccentricity)의 확률 분포

다양한 적색편이에서 이심률 확률 분포를 보여주고 있다. 우주가 진화할수록 병합하는 궤도는 1보다 작은 속박된 궤도(Bound Orbit)를 가지고, 원 궤도($e=1$)의 확률이 높아진다. 오차의 크기는 표본의 포아송 오차이다.

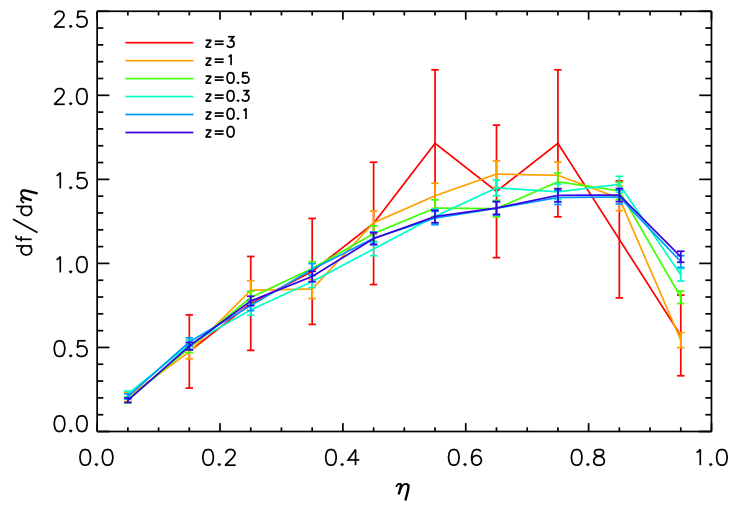


그림 2.5. 다양한 적색편이에서 원형성 인자(Circularity)의 확률 분포

다양한 적색편이에서 원형성 인자의 확률 분포를 보여주고 있다. 우주가 진화할수록 병합하는 궤도는 과거에 비해 원에 가까운 궤도($\eta = 1$)를 갖는다. 오차의 크기는 표본의 포아송 오차이다.

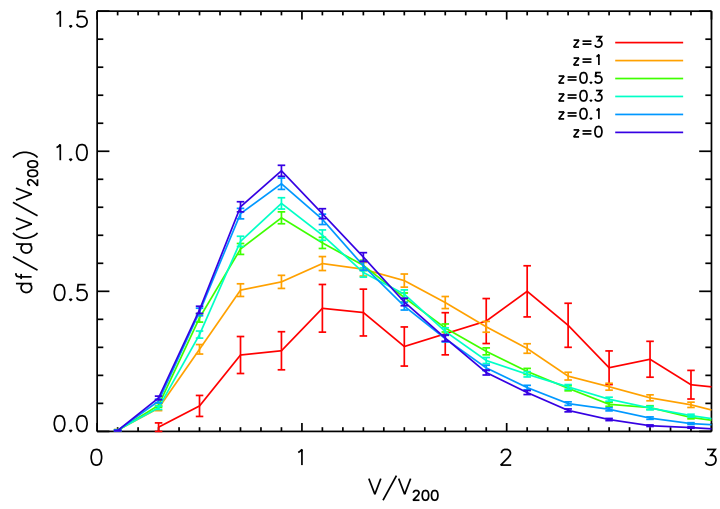


그림 2.6. 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 진입속도의 확률 분포

다양한 적색편이에서 진입 속도의 확률 분포를 보여주고 있다. 우주가 진화할수록 병합하는 궤도 분포의 최대값의 위치가 작은 속도를 가진다. 과거의 우주($z > 1$)에서는 병합하고 있는 위성 헤일로의 진입 속도가 중심 헤일로의 비리얼 속도보다 큰 값을 가지지만 현재의 우주에서는 위성 헤일로의 진입 속도가 중심 헤일로의 비리얼 속도를 가진다. 오차의 크기는 표본의 포아송 오차이다.

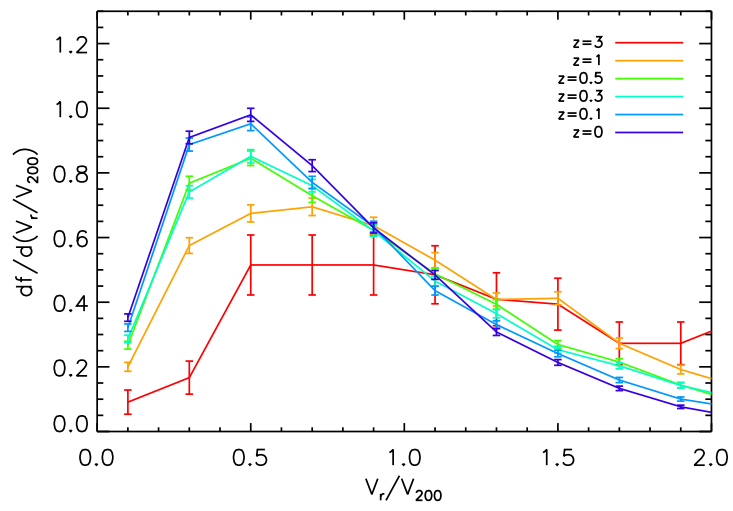


그림 2.7. 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로들의 방사상 속도의 확률 분포

다양한 적색편이에서의 진입 속도의 방사상 속도를 보여주고 있다. 적색편이 값이 작아질수록 방사상 속도가 줄어들고 있다는 사실을 알 수 있다. 오차의 크기는 표본의 포아송 오차이다.

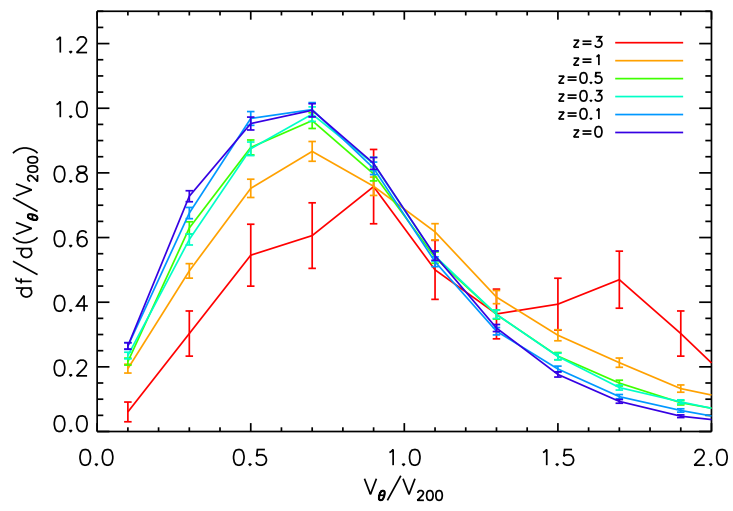


그림 2.8. 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로 접선 속도의 확률 분포

다양한 적색편이에서 진입 속도의 접선 속도를 보여주고 있다. 그림 2.7과 비교했을 때, 접선 성분 속도는 방사상 성분 속도에 비해 과거의 우주와 큰 차이를 보이지 않는다. 오차의 크기는 표본의 포아송 오차이다.

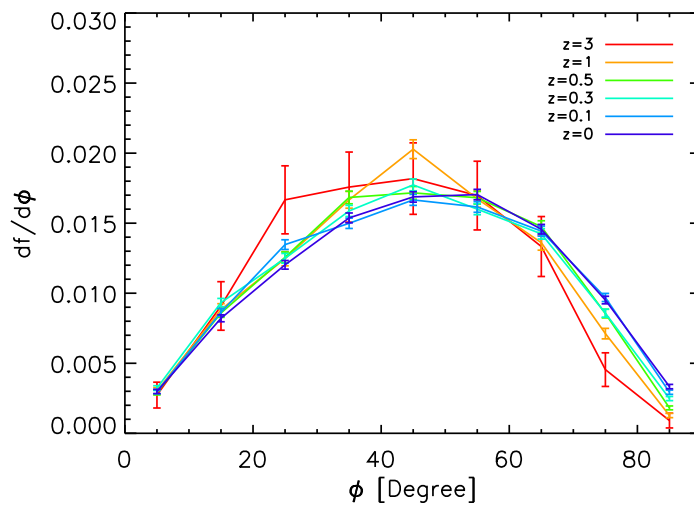


그림 2.9. 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 진입각도의 확률 분포

다양한 적색편이에서 진입 각도 확률 분포를 보여주고 있다. 우주가 진화할 수록 병합 가정의 위성 헤일로의 진입 각도가 과거에 비해 큰 값을 가진다. 이는 그림 2.4와 그림 2.5에서 알 수 있는 결과와 같이 현재의 우주에서 좀더 원에 가까운 궤도를 가진다는 사실을 알 수 있다. 오차의 크기는 표본의 포아송 오차이다.

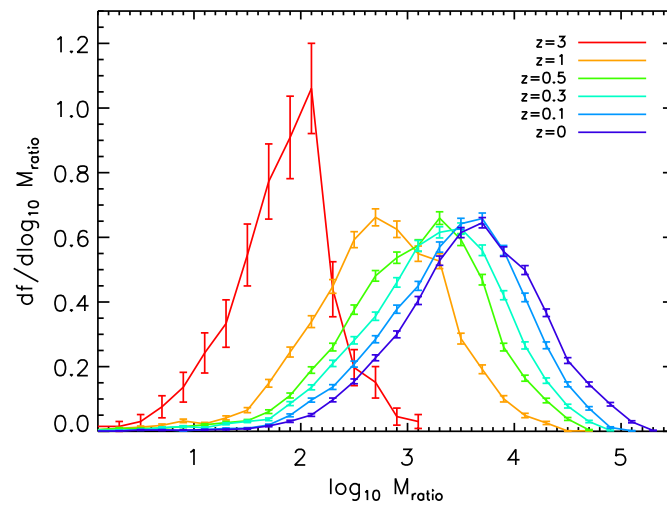


그림 2.10. 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 중심 헤일로와 위성 헤일로의 질량비의 확률 분포

다양한 적색편이에서 병합하고 있는 중심 헤일로와 위성 헤일로의 질량비를 보여주고 있다. 과거의 우주에 비해서 현재의 우주에서 일어나는 병합 과정은 중심 헤일로와 위성 헤일로의 큰 질량비 차이를 보이고 있다. 오차의 크기는 표본의 포아송 오차이다.

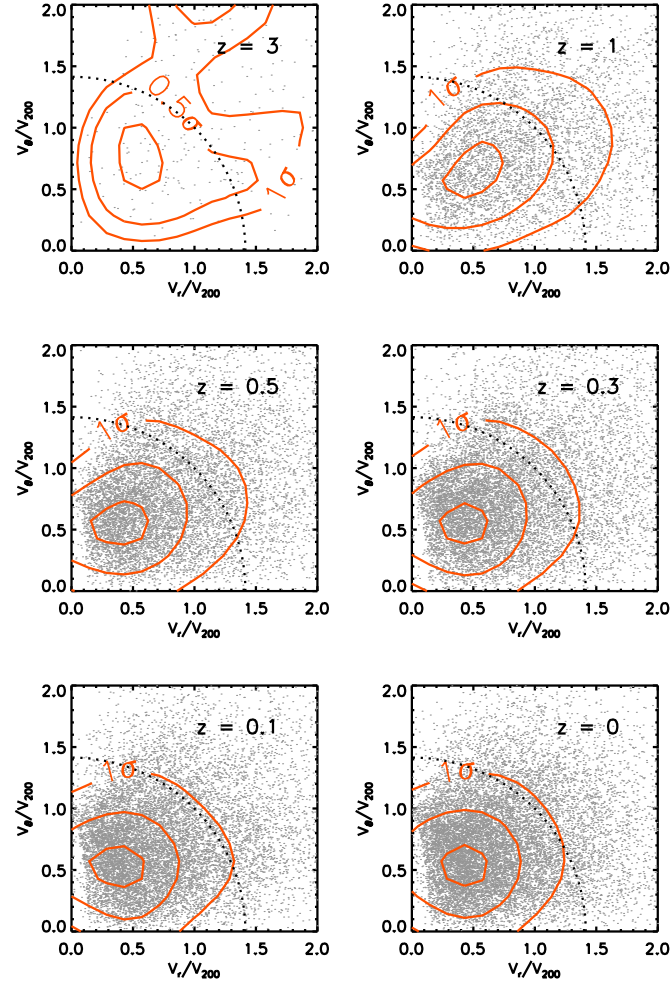


그림 2.11. 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 방사상 속도와 접속 속도의 분포

다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 방사상 성분 속도와 접선 성분 속도 분포를 보여주고 있다. 회색 점은 병합이 진행 중인 위성 헤일로의 방사상 속도와 접선 속도를 의미하고 주황색 선은 안쪽부터 0.1σ , 0.5σ , 1σ 영역을 의미한다. 과거의 우주에서 현재의 우주로 진화할 수록 1σ 영역이 점차 점선 안쪽으로 분포 하고 있다. 점선은 중심 헤일로의 탈출 속도이다.

대신 1000:1 이상의 작은 규모의 병합이 발생한다.

그림 2.11은 병합하고 있는 위성 헤일로의 방사상 속도와 접선 속도의 분포이다. 위성 헤일로의 진입 속도를 방사상 성분과 접선 성분으로 분리해서 조사 할 경우 병합 과정을 추정할 수 있다. 그림 2.11에서 주황색 선 영역을 살펴 보면 과거에서 현재로 진화 할수록 병합의 모습이 달라짐을 알 수 있다. 과거의 우주에서 현재의 우주보다 좀 더 방사상 성분 쪽으로 치우친 모습을 볼 수 있다. 이후 주황 색선 영역이 점선 안쪽으로 조밀하게 분포한다. 그림 2.4, 2.5, 2.9 에서도 볼 수 있었듯이, 우주가 진화 할 수록 병합하고 있는 위성 헤일로는 방사상 성분이 강한 궤도에서 점차 접선 성분이 강한 궤도를 가진다.

3.2 주변 환경에 따른 위성 암흑 헤일로 의 궤도 정보

주변 환경이 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도에 끼치는 영향을 연구하기 위해서 Press-Schechter 형식(Press-Schechter Formalism, Press & Schechter 1974)을 이용했다. 여기서 특정 시점의 M_* 는 McBride가 만든 강착 질량 함수(Mass Accretion Function)를 사용했다. 그 식은 아래와 같이 표현된다.

$$M_*(z) = M_0(1+z)^\beta e^{-\gamma z} \quad (2.8)$$

여기서 M_0 는 현재 우주에서의 M_* 를 의미하고, β, γ 는 다양한 강착 질량 함수를 결정하는 자유 상수이다. 본 연구는 국부 은하단 규모의 강착 질량 함수를 잘 맞추는 Type II($(\beta - \gamma) < -0.45$)를 사용했다(McBride et al. 2009).

그림 2.11-2.14는 다양한 적색편이($z=2.0, 1.0, 0.5, 0.3, 0.1, 0.0$)에서 질량이 M_* 보다 큰 집단과 작은 집단의 방사상 속도(V_r), 접선 속도(V_θ), 원형성 인자(η) 그리고 이심률(e)의 확률 분포를 보여준다. $z=2$ 에서는 질량이 M_* 보다 작은 집단의 갯수가 매우 적은데 이는 우리가 사용한 그룹 찾기의 최소 질량과 적색편이 2인 우주에서 M_* 가 비슷하기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 적색편이가 2보다 작은($z < 2$) 수치 시뮬레이션의 결과에 대해서만 주변 환경에 따른 위성 헤일로의 궤도 정보를 연구했다.

$z > 0.3$ 인 우주에서 $M < M_*$ 인 집단과 $M > M_*$ 인 집단에서 방사상 속도와 접선 속도가 서로 다른 분포를 갖는다. 반면 $z < 0.3$ 인 우주는 방사상 속도와 접선 속도의 확률 분포는 $M > M_*$ 인 집단과 $M < M_*$ 인 집단에서 큰 차이가 없다. 하지만 미세하게 M_* 보다 작은 집단의 병합 양상은 M_* 보다 큰 집단보다 전체적으로 더 큰 속도를 가지고 병합하고 있다. 단위 질량 각운동량은 Benson의 식 2.2에 의해서 접선 속도와 같은 분포를 가지기 때문에 위성 헤일로는 $M > M_*$ 인 집단보다 $M < M_*$ 인 집단에서 보다 큰 각운동량을 가지고(그림 2.12-그림 2.17 위-왼쪽) 병합된다.

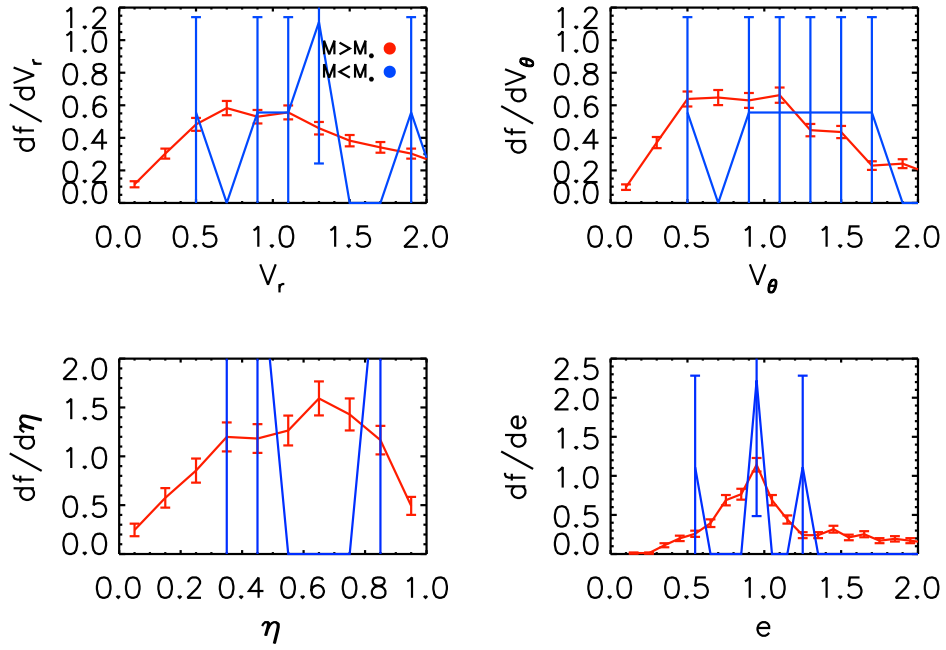


그림 2.12. $z=2.0$ 인 우주

파란색 선은 중심 헤일로 질량이 Press-Schechter 질량 함수의 임계 질량 M_* 보다 작은 표본 집단을 의미하고, 주황색 선은 중심 헤일로 질량이 M_* 보다 큰 표본 집단을 의미한다. 위-왼쪽 그래프는 위성 헤일로의 진입 속도의 방사상 성분 속도의 확률 분포 함수를 보여주고, 위-오른쪽 그래프는 위성 헤일로의 진입 속도의 접선 성분 속도의 확률 분포 함수를 보여준다. 아래-왼쪽 그래프는 위성 헤일로의 궤도 정보 중 원형성 인자의 확률 분포 함수를 보여주고, 아래-오른쪽 그래프는 위성 헤일로의 이심률 확률 분포 함수를 보여준다. 각 그래프에서 오차의 크기는 표본의 포아송 오차이다.

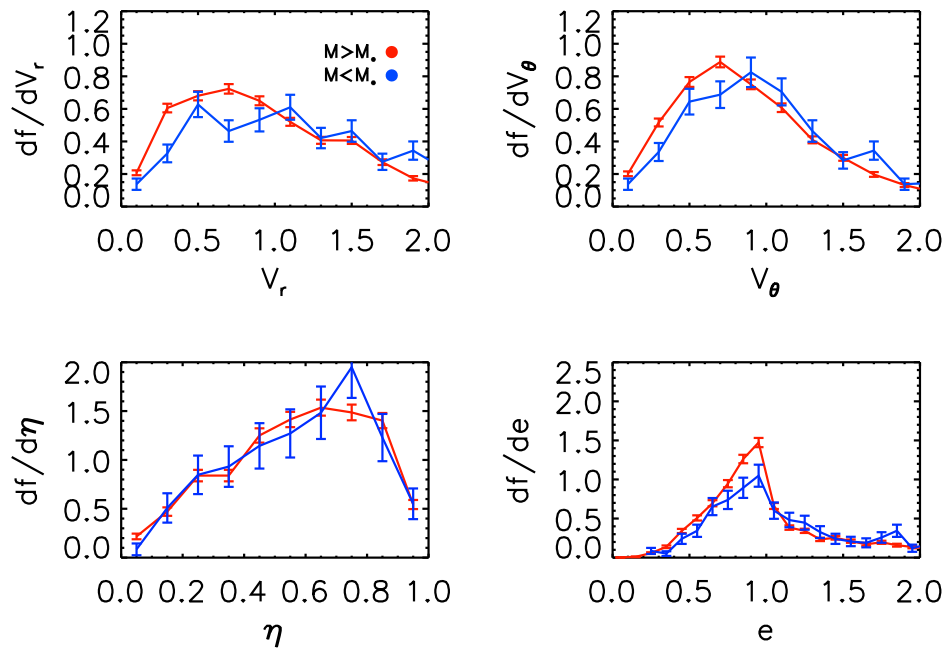


그림 2.13. $z=1$ 인 우주

그림 2.12와 동일 하지만 $z=1.0$ 인 우주를 보여준다.

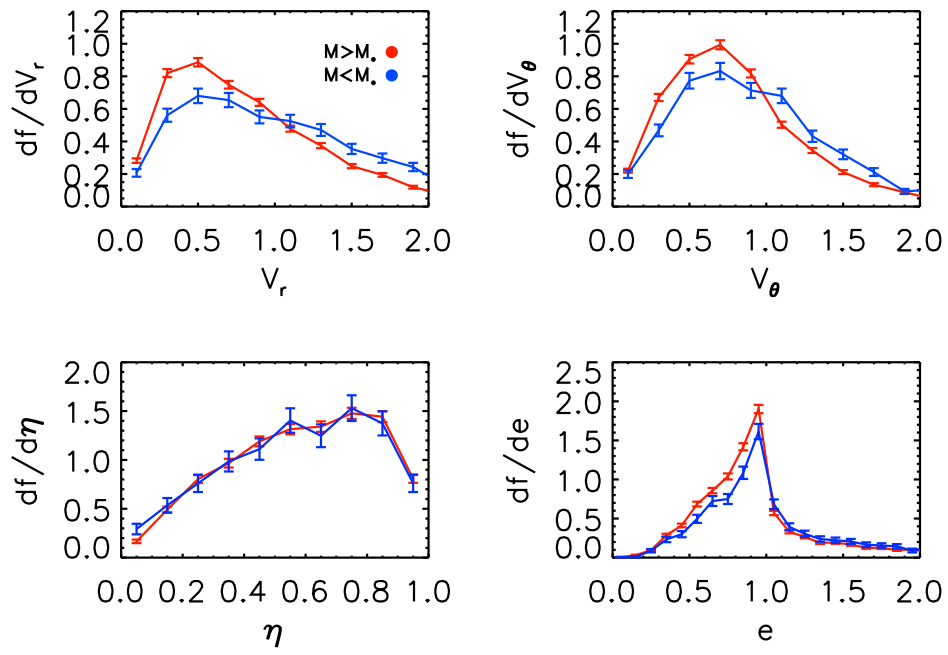


그림 2.14. $z=0.5$ 인 우주

그림 2.12와 동일 하지만 $z=0.5$ 우주를 보여준다.

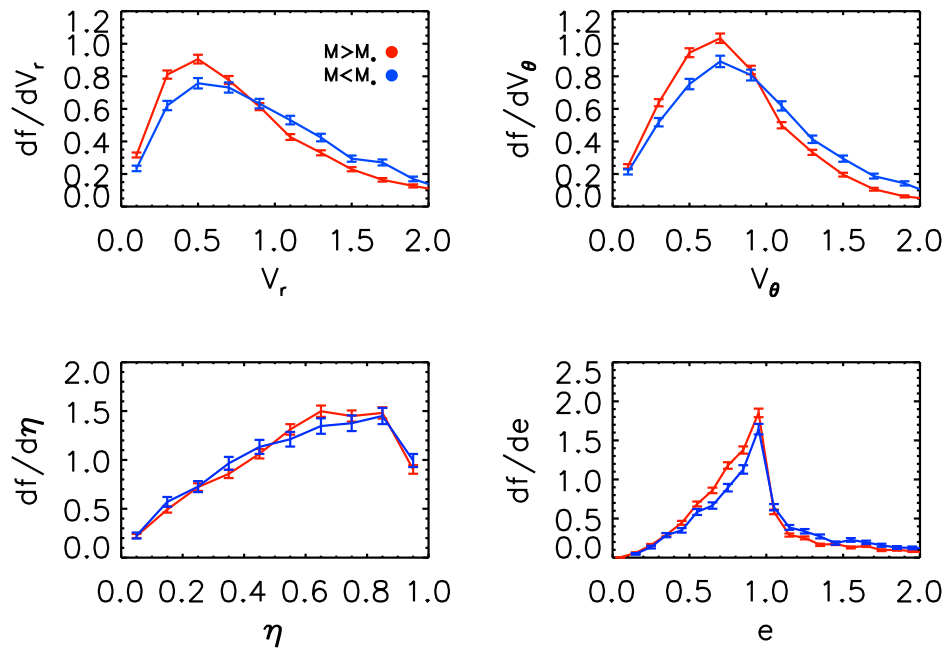


그림 2.15. $z=0.3$ 인 우주

그림 2.12와 동일 하지만 $z=0.3$ 인 우주를 보여준다.

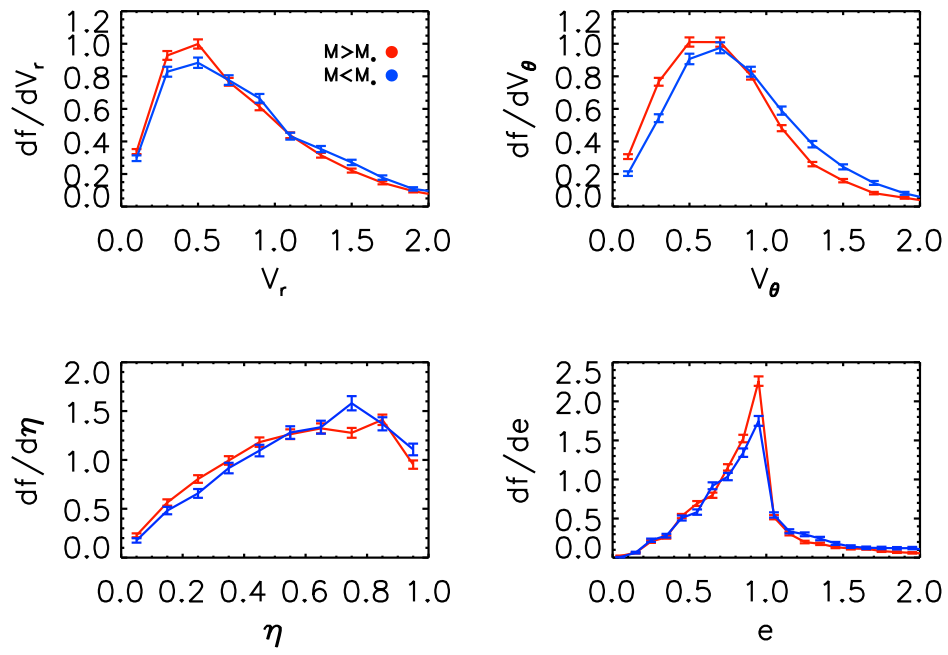


그림 2.16. $z=0.1$ 인 우주

그림 2.12와 동일 하지만 $z=0.1$ 인 우주를 보여준다.

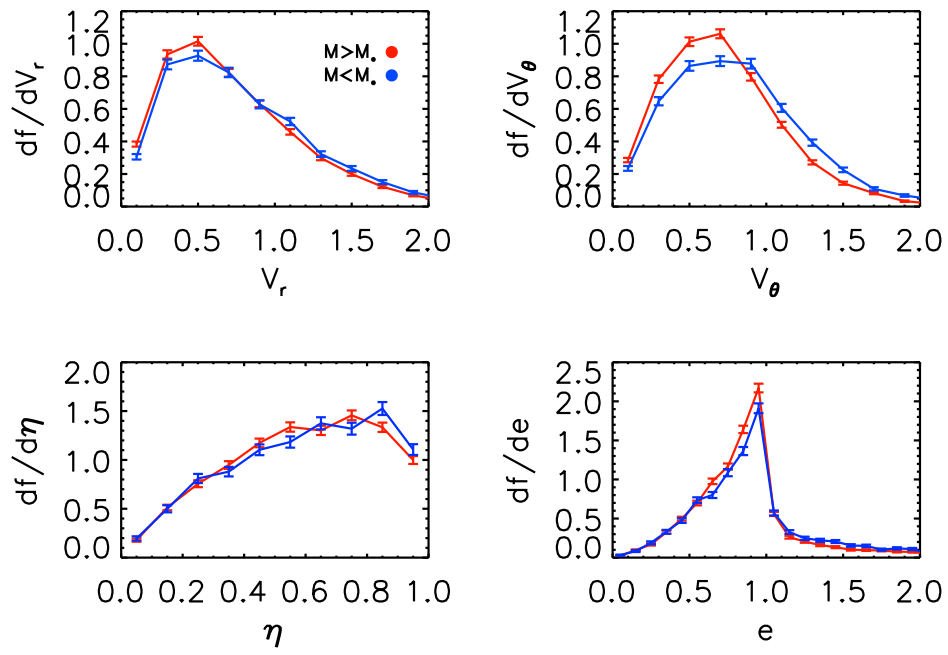


그림 2.17. $z=0$ 인 우주

그림 2.12와 동일 하지만 $z=0.0$ 인 현재 우주를 보여준다.

제 4 절 토의 및 결론

본 연구는 Λ CDM 패러다임을 가지고 수행된 우주론적 수치 시뮬레이션으로부터 우주의 생성 초기부터 현재의 우주까지 다양한 시간에서 발생하는 병합하고 있는 위성 헤일로들의 궤도 정보를 계산하고 다양한 궤도 정보의 분포를 통해서 병합 방법이 발생하는 시간에 따라 다른 양상이 있음을 밝혔다. 과거의 선행 연구에서 병합하고 있는 위성 헤일로들의 궤도 정보를 계산하는 방법은 병합 과정을 거치고 있는 위성 헤일로를 대상으로 수행했기 때문에 사실적인 궤도 정보를 얻을 수 없었다. Tormen(1997), Khochfar & Burkert(2006)는 제한적이지만 수치 시뮬레이션의 결과를 시간 순서 적으로 병합이 진행될 헤일로를 대상으로 위성 헤일로들의 궤도 정보를 연구했다. 이 후 Benson(2005)는 이전의 선행 연구를 바탕으로 통계적으로도 의미 있는 많은 표본을 가지고 보다 사실적인 궤도 정보 계산 식을 이용해서(식 2.2 - 식 2.7) 위성 헤일로들의 궤도 정보 연구를 수행했다. Benson(2005)의 연구는 병합하고 있는 위성 헤일로들의 궤도 정보 연구에 많은 기여를 했지만, 위성 헤일로들의 궤도 정보를 계산하는 과정에서 역학적 마찰력을 무시한 채 연구를 수행 했다. 이에 본 연구는 선행 연구를 바탕으로 좀 더 사실적인 병합하고 있는 위성 헤일로들의 궤도 연구에 초점을 맞추고 연구 방법을 향상 시켰다.

본 연구에서 가장 주안점을 두고 연구한 부분 중 하나는 병합하고 있는 위성 헤일로들의 궤도 정보를 계산할 때, 균일성을 맞추고자 중심 헤일로들의 비리얼 반지름에 위치 했을 때 위성 헤일로들의 위치와 속도를 계산하는 부분이다. 기존의 연구는 위성 헤일로들의 위치와 속도를 보정하는 과정에서 역학적 마찰력을 고려하지 않고 보정이 이루어 진다. 만약 위성 헤일로들의 위치가 중심 헤일로들의 비리얼 반지름 바깥 부분에 있다면 역학적 마찰력은 큰 영향을 주지 않는다. 문제는 위성 헤일로들의 위치가 중심 헤일로들의 비리얼 반지름 안쪽 부분에 위치 할 때이다. 중심 헤일로들의 비리얼 반지름 안쪽에 위치한 위성 헤일로는 이미 중심 헤일로들의 밀도 분포에 의해서 역학적 마찰력을 받고 있다. 만약 역학적 마찰력에 의해 잃어버린 선형운동량과 각운동량을 보정하지 않고 위성 헤일로들의 위치와 속도를 보정하게 되면 실제 병합 시점의 궤도 정보를 구할 수 없다. 이를 위해서 2차원 공간에서 중심 헤일로와 위성 헤일로들의 위치를 계산하는 과정에서 역학적 마찰력에 의해 잃어버린 선형운동량과 각운동량을 보정해주고 위성 헤일로들의 궤도 정보를 계산했다.

본 연구의 또 다른 강점은 병합 후보를 찾는 과정에서 병합 계층 구조(Merger Tree)를 사용한 점이다. 선행 연구에서 병합 후보를 찾는 과정은 특정 시간의 결과에 대해서 중심 헤일로와 비리얼 반지름 부근에서 발견되는 위성 헤일로중 중심 헤일로 방향으로 움직이는 위성 헤일로를 이용한다. 병합 계층 구조를 이용해서 병합 후보를 찾는 과정은 특정 시간(S_n)에서 정의된 헤일로의 다음 시간(S_{n+1})에서 병합되는 헤일로를 병합 후보로써 선택한다. 병합 계층 구조를 이용한 위성 헤일로의 궤도 연구는 이전의 선행 연구에 비해 손쉽게 병합하는 헤일로를 이용할 수 있는 장점이 있다.

보다 사실적인 방법으로 계산된 위성 헤일로의 궤도 정보중 이심률의 분포를 보면(그림 2.4) 최고값의 위치가 타원 궤도($e=1$) 근처에 있다. 이 결과는 Benson(2005), Khochfar & Burkert(2006)의 결과와 유사한 분포를 보여주고 있지만 확률 분포의 값에는 차이를 보이고 있다. 이 차이는 초기 위성 헤일로의 위치와 속도 보정에 기인한다. 본 연구에서 계산된 궤도 정보의 분포는 적색편이 z 에 따라 경향 성을 보일 뿐 아니라 헤일로가 형성되는 주변 환경에 따라 경향 성을 보이고 있다. 그림 2.4-2.9, 2-11은 병합하고 있는 위성 헤일로의 이심률, 원형성 인자, 진입 속도, 진입 각도의 확률 분포와 방사상 성분 속도-접선 성분 속도 분포를 보여주고 있다. 과거의 우주에서 발생하는 병합 과정이 현재의 우주에서 발생하는 병합 과정보다 훨씬 포물선 궤도에 가까운 궤도를 가지고 있고, 보다 적은 각운동량을 가지고 병합 과정이 진행되며, 보다 빠른 속도로 진입한다. 그림 2.10은 병합하고 있는 중심 헤일로와 위성 헤일로의 질량비를 보여준다. 과거의 우주에서 현재 우주보다 큰 규모의 병합이 발생하는데 이는 병합을 통해서 구조를 성장하는 정상 우주론의 이론을 설명해준다.

헤일로가 속해 있는 주변 환경이 병합 방법에 영향을 준다는 사실을 그림 2.12-2.17로부터 알 수 있다. 주변 환경을 정의 하기 위해서 적색편이에 따른 Press-Schechter 질량 함수(Press & Schechter 1974)의 M_* 를 이용했다. 과거의 우주일수록 중심 헤일로의 질량이 M_* 보다 큰 집단과 M_* 보다 작은 집단에서 더 큰 진입 속도와 더 많은 각운동량을 가지고 병합이 이루어진다. 우주 형성과 진화 모델을 연구 할 때 시간에 따른 궤도 요소 뿐만 아니라 중심 헤일로가 속해 있는 주변 환경에 따른 궤도 요소 분포를 이용해야 한다.

제 3 장

병합 중인 위성 암흑 헤일로의 역학적 진화

제 1 절 서문

현재 통용되는 우주론에서 우리 우주는 계층적 병합을 거치면서 작은 밀도 요동으로부터 구조의 규모를 키워 나간다. 정상 우주론에서 묘사하는 우주는 충돌을 하지 않는 성질을 가지는 암흑 물질들로 암흑 헤일로를 형성하고, 암흑 헤일로 내부에서 밝은 은하들이 생성되는 작용을 거친다. 이 때, 이전 세대의 부구조(Substructure)들은 새로운 세대에서 완전히 없어진다고 가정한다(White & Rees 1978). 그러나 질량 분해능이 작은 수치 시뮬레이션(High-resolution N-body Simulation)의 결과에 경우 우주가 존재하는 동안 부구조들은 사라지지 않고 지속된다(Klypin et al. 1998, Moore et al 1999a). 관측 적 결과 역시 수치 시뮬레이션 결과와 부합한다. 위성 헤일로는 역학적 마찰력(Dynamical Friction), 조석력(Tidal Force) 그리고 충돌을 통해서 자신의 질량을 잃는다. 위성 헤일로의 질량 손실 시간, 질량 손실 과정은 위성 헤일로의 병합 궤도에 많은 영향을 받는다. 병합하고 있는 위성 헤일로는 조석력과 역학적 마찰력에 의해 각운동량과 에너지를 잃으면서 중심 헤일로와 가까워진다.

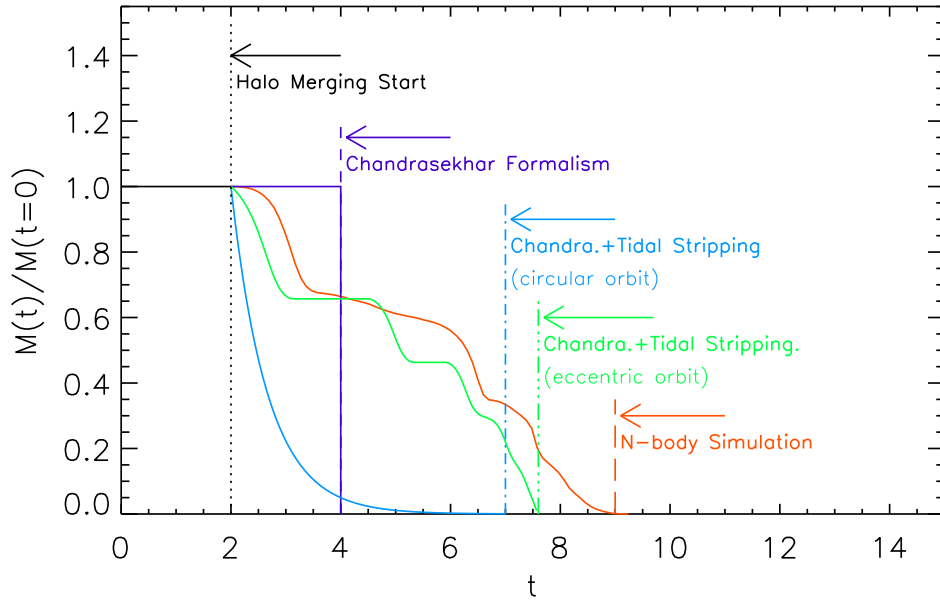


그림 3.1. 질량 손실 함수의 개념적 그림

해석적 방법으로 계산한 질량 손실 함수와 수치 시뮬레이션으로 계산 질량 손실 함수를 개념적으로 보여주고 있다. 찬드라세카 식에 의해서 병합이 시작하고 나서 위성 헤일로가 중심 헤일로의 비리얼 반지름에 들어가는 순간 위성 헤일로는 중심 헤일로로 순식간에 질량을 잃어버린다(보라색선). 찬드라세카 식에 조석 효과를 도입해서 계산할 경우 위성 헤일로의 궤도가 완전한 원의 궤도를 가질 때는 지수적으로 감소 하지만(하늘색선) 타원 궤도를 가질 때는 위성 헤일로의 질량을 단계적으로 잃어버린다(녹색선). 수치 시뮬레이션의 결과는 실제 헤일로 모델을 통해서 위성 헤일로의 역학적 진화를 관찰함으로써 해석적 방법보다 더 사실적인 질량 손실을 보여주고 있다(주황색선).

우주가 계층적 병합 방법을 통해 구조가 성장한다는 우주 모델 위에서 은하 형성을 제대로 이해하려면 거대 구조의 이해 뿐만 아니라 헤일로-헤일로 간 병합 과정을 이해 해야 한다. 하지만 지금까지 우리가 알고 있는 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 진화에 대한 이해 수준은 매우 빈약하다. 그림 3.1은 병합하고 있는 위성 헤일로의 질량 손실량을 개념적으로 보여준다. 과거 찬드라세카 근사방식(Chandrasekhar 1943)만을 이용한 경우 병합 시간이 짧을 뿐 아니라, 방법론적인 한계로 인해 질량 손실이 한 순간에 발생된다. 찬드라세카 근사방식에 조석 효과를 도입하게 되면 다체 시뮬레이션의 결과와 어느 정도 일치하지만 질량 손실의 개형과 병합 시간을 여전히 맞추지 못한다.

본 연구의 첫 번째 목적은 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 진화를 이해하는 것이다. Tormen(1997) 과 Ghigna et al.(1998)는 수치 시뮬레이션을 통하여 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도의 이심률이 크다는 사실을 발견했다. 본 연구에서 는 이 값에 유사한 궤도와 좀더 원에 가까운 궤도에 대해서 연구를 진행하였다. 또한 그 동안의 연구들은 등온 헤일로(Isothermal Halo)에 대해서 병합 시뮬레이션을 수행했다. 우주에 존재하는 암흑 헤일로의 경우 하나의 밀도 분포로 표현이 가능하다고 알려져 있고(Navarro, Frenk & White(NFW) 1995, 1996, 1997), Hernquist에 의해 타원 은하의 성질을 만족 시키는 모델을 고안했는데 이 모델 역시 NFW 밀도 분포와 유사 하다는 사실이 알려져 있다(Springel 2005). 좀 더 사실적인 위성 헤일로의 역학적 진화를 이해하기 위해서 다양한 헤일로 밀도 분포에 대한 연구를 진행 하고자 한다.

위성 헤일로의 역학적 진화에 대한 이해를 통해 준해석적모델에서 사용되는 병합하고 있는 질량 손실 계산에 대한 모형에 큰 기여를 할 수 있다. 현재까지 준해석적모델에서는 해석적 방법을 기반으로 역학적 마찰력과 조석력을 이용해서 질량 손실을 계산한다. 이 때 우리가 아직 알지 못하는 부분에 대해서 경험적인 방법과 수치 시뮬레이션으로부터 얻은 결과를 이용해서 질량 손실을 계산한다(Velázquez & White 1999; Taylor & Babul 2001, 2004; Benson et al. 2004; Hayashi et al. 2003; Taffoni et al. 2003.; Fellhauer 2007; Boylan-Kolchin 2008, Kimm 2009). 이 들의 결과들은 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 진화를 설명하기에 여전히 부족한 점들이 있다. 본 연구는 수치 모델을 통해 좀 더 사실적인 모델을 제시하고자 한다.

제 2 절 수치 모델

이번 연구에서 가장 중요한 요소는 얼마나 의미있는 헤일로 모델을 사용하는 것과 물리적으로 의미있는 병합 궤도를 만드는 일이다. 사용된 헤일로 모델로는 Hernquist가 만든 모델(Hernquist 1990)과 Narro, Frenk & White 에 의해서 만들어진 모델(Navarro, Frenk & White 1995, 1996, 1997 이하 NFW) 두가지 이다. 두가지 헤일로 모델을 수치 시뮬레이션에서 사용하기 위한 다체 모델 구현화(N-body Realization)는 Hernquist에 의해서 제안 된 방법(1993a)과 Springel이 이를 발전시킨 방법(Springel 2005)을 사용하였다. 만들어진 헤일로 모델을 실제 연구에 사용하기 위해서 안정적인 밀도 분포가 오랜 시간 동안 유지되는지 확인하였다.

2.1 헤일로 밀도 함수

NFW 모델의 밀도 분포는 아래와 같이 주어진다.

$$\rho(r) = \rho_{crit} \frac{\delta_c}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2} \quad (3.1)$$

이 때 척도 반지름 r_s 는 아래와 같이 정의 된다.

$$r_s \equiv \frac{r_{200}}{c}, \quad (3.2)$$

r_{200} 은 현재 우주의 임계밀도(Critical Density)의 200배가 되는 지점의 중심으로부터 거리를 나타내고 있으며, c 는 헤일로의 집중도 지수(Concentration Index)이다. δ_c 는 지표 밀도로 현재 사용되고 있는 우주의 비리얼 초과 밀도(Virial Overdensity)에 의해서 결정되며 아래와 같이 표현된다.

$$\delta_c = \frac{vc^3 g(c)}{3} \quad (3.3)$$

여기서 사용되는 $g(c)$ 는 아래와 같이 정의 된다.

$$g(c) = \frac{1}{\ln(1+c) - c/(1+c)}. \quad (3.4)$$

비리얼 초과 밀도(Virial Overdensity) v 는 $v=200$ 으로 사용했다. 이 값은 현재 우주의 임계 밀도(ρ_{crit} , Critical Density)보다 200배 이상인 지역은 운동계가 이완 되었음을 나타낸다. 집중도 지수(Concentration Index) c 는 NFW 헤일로 밀도 분포의 형태를 결정한다. 보편적으로 Λ CDM 우주론에서 사용되는 c 값은, 은하단 규모일 경우 $c=5$ 이며, 매우 밝은 은하단의 경우 $c=10$ 으로 사용된다(Lokas 2001). 하지만 이렇게 고정된 집중도 지수(Fixed Concentration Index)는 다양한 질량범위에서 은하단의 밀도 함수의 형태를 결정하기 매우 부족하다. 좀 더 사실적인 시뮬레이션을 위해서 Λ CDM 시뮬레이션으로부터 얻어진 헤일로들 밀도 함수의 형태를 이용해서 얻어진 식을 사용하였다(Neto et al. 2005). 사용된 식은 헤일로의 질량과 집중도 지수의 관계를 보여주는데 그 식은 아래와 같다.

$$c_{200} = 5.26(M_{200}/10^{14}h^{-1}M_{\odot})^{-0.10} \quad (3.5)$$

여기서 사용되는 M_{200} 은 r_{200} 내에 포함된 질량을 의미한다. 특별히 Neto의 관계식중 이완된(Relaxed)경우의 헤일로 결과를 사용하였다.

Hernquist 헤일로 밀도 분포는 아래와 같이 주어진다.

$$\rho(r) = \frac{M}{2\pi} \frac{a}{r(r+a)^3} \quad (3.6)$$

여기서 밀도 분포의 형태를 결정하는 중요한 인자는 척도 길이(Scale Length) a 이다. 이 값은 NFW 헤일로 모델의 집중도 인자 c 와 매우 유사한 성질을 가지고 있다. 이번 연구에서는 서로 다른 헤일로 모델을 사용하기 때문에 두 모델의 통일성을 유지 해야 한다. 이를 위해서 집중도 인자와 척도 길이 간의 상관 관계식을 사용하였다(Springel 2005). 상

관 관계식은 아래와 같다.

$$a = r_s \sqrt{2[\ln(1+c) - c/(1+c)]} \quad (3.7)$$

식 3.7 을 이용하면, Hernquist 모델의 경우에도 같은 집중도 인자를 이용할 수 있다.

2.2 다체 모델 구현화

다체 모델 구현화(N-body Realization)는 알려져 있는 헤일로 밀도 함수를 많은 수의 입자를 사용해서 모델을 만드는 작업이다. Hernquist는 알려진 밀도 분포와 Jeans 방정식을 이용하여 직관적인 다체 모델 구현화 방법을 제시하였다(Hernquist 1993). 헤일로를 구성하는 입자들의 위치는 알려진 밀도 분포를 Transformation Method를 사용해서 결정된다. 각 입자의 속도의 경우 각 위치에서 입자들이 가질 수 있는 속도 분산을 이용한다. 이때 입자들의 속도 분산은 Jeans 방정식의 해이다. Jeans 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{dr} (\rho \sigma_r^2) + 2\beta \frac{\sigma_r^2}{r} = -\frac{d\Phi}{dr}. \quad (3.8)$$

먼저 Jeans 방정식에서 Φ 는 헤일로 모델의 위치 에너지이다. 이번 연구에서 는 두 가지 헤일로 모델(NFW, Hernquist)을 사용하기 때문에 서로 다른 함수를 사용해야 한다. 각 헤일로 모델의 위치 에너지는 아래와 같이 주어진다(Hernquist 1990, Lokas 2001).

$$\Phi(s)_{\text{NFW}} = -g(c)V_c^2 \frac{\ln(1+cs)}{s}, \quad s = r/r_{200} \quad (3.9)$$

$$\Phi(r)_{\text{Hernquist}} = -\frac{GM}{r+a} \quad (3.10)$$

Jeans 방정식에서 β 는 헤일로 모델의 속도 성분을 계산하는데 있어서 매우 중요한 상수이다. 이 값은 비등방성 지수(Anisotropy Parameter)를 나타내며 아래와 같이 정의된

다.

$$\beta = 1 - \frac{\sigma_\theta^2}{\sigma_r^2} \quad (3.11)$$

계산의 편의를 위해서 $\beta=1$ 인 경우 즉, 속도 분산이 방사상 방향만 존재하는 헤일로 모델을 선택하였다. Jeans 방정식으로부터 얻어진 해를 이용해서 각 입자의 속도를 정해 주기 위해서 Hernquist(1993)의 방법을 이용하였다. 계산된 속도 분산을 가지는 Maxwell 분포를 만든 후, 무작위로 속도를 선택하게 한다. 이 때 중요한 점은 선택된 속도가 현재 위치에서 탈출 속도의 0.95배를 넘지 않게 설정하였다.

$$v_{rand} \leq 0.95 \times v_{esc}$$

다체 구현화 작업을 통해 만들어진 헤일로의 역학적 안정성을 확인하기 위해서 GADGET2 코드를 이용해 역학적으로 고립된 헤일로를 중력만 고려하여 진화를 살펴보았다. 각 시기에서 헤일로의 밀도 분포가 초기 밀도 분포와 잘 맞는지 확인 하기 위해서 두 모델의 시뮬레이션 결과로부터 밀도 분포를 계산한 다음 초기 밀도 분포와 비교를 했다. 그림 3.2-3.3 은 NFW, Hernquist 헤일로 모델의 안정성 실험 결과이다. 두 헤일로 모델 모두 150억 년 동안 초기 밀도 분포를 비리얼 반지름 안쪽 부분에 비교적 잘 맞추고 있다. 이 때 초기 밀도 분포와 각 시기에서 계산된 밀도 분포의 차이는 속도를 정의하는 과정에서 Maxwell 분포를 이용했기 때문이다. Maxwell 분포를 이용할 경우 탈출 속도보다 큰 속도를 가지는 입자들이 헤일로를 이탈함으로써 시간이 지날수록 질량이 줄어드는 효과를 보여준다.

2.3 병합하고 있는 위성 암흑 헤일로의 궤도 정보

중심 헤일로와 위성 헤일로의 병합 시뮬레이션을 수행하기 위해서 가장 중요한 작업 중 하나는 병합 상황을 만드는 작업이다. 이번 연구에서 중심 헤일로와 위성 헤일로 2개 만을 사용하게 되는데 이는 쌍성의 역학적 상황과 비슷하다. 쌍성의 궤도의 경우 두 별의

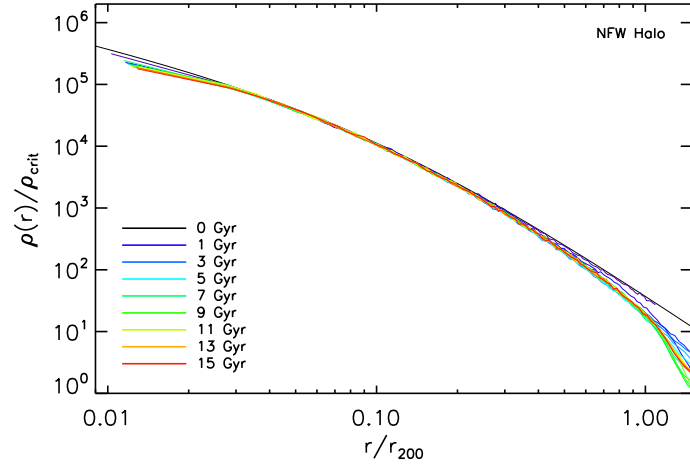


그림 3.2. NFW 헤일로 안정성 시험

검은색 선은 모델에 사용된 NFW 밀도 분포를 의미하고, 나머지 색이 있는 선들은 각 시간대에서 중력적으로 진화한 헤일로 모델의 밀도 분포를 의미한다. 약 150억 년 까지 중력적으로 진화 시켰을 때, 비리얼 반지름 안쪽 부분에서 초기 밀도 분포를 잘 맞추고 있다.

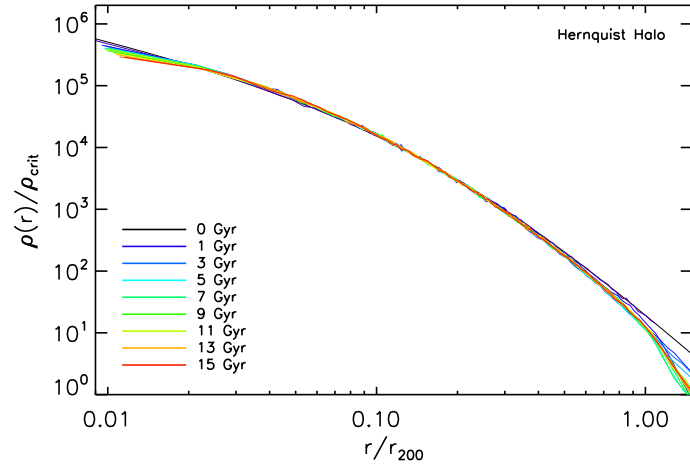


그림 3.3. Hernquist 헤일로 안정성 시험

그림 3.2 와 동일하지만 헤일로의 밀도 분포를 Hernquist 밀도 분포를 사용했을 경우.

총 에너지(E)와 각운동량(L)에 의해서 다양한 궤도를 만들어 낸다. 다양한 궤도를 정량화 하기 위해서 원형성 인자(Circularity Parameter) η 를 도입하였다. 원형성 인자 η 는 아래와 같이 정의 된다(Lecey & Cole 1993).

$$\eta \equiv \frac{L}{L_c(E)}, \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad (3.12)$$

여기서 L_c 는 위성 헤일로가 중심 헤일로의 비리얼 반지름에서 비리얼 속도로 완전한 원 궤도를 가질 때의 각운동량을 의미한다. 실제 병합 시뮬레이션에서는 원형성 인자 η 를 이용해서 병합 시뮬레이션의 각운동량을 조절할 수 있다. 실제로 이번 연구는 $\eta = 0.650.46$ 대해서 계산을 수행하였다.

원형성 인자 η 에 의해 결정된 각운동량을 이용하여 두 헤일로의 궤도를 추정하기 위해서는 궤도의 이심률, 장축 길이, 초기 위치 그리고 초기 속도가 필요하다. 먼저 이심률은 원형성 인자와 $e = \sqrt{1 - \eta^2}$ 식을 통해서 얻는다. 장축 길이는 아래의 식을 이용한다.

$$a = \frac{L^2}{(1 - e)^2 \mu G M_h M_s}. \quad (3.13)$$

여기서 μ 는 환산 질량으로 $M_h M_s / (M_h + M_s)$ 이다. 위성 헤일로의 초기 위치는 중심 헤일로의 비리얼 반지름에 위치한다. 이것은 대부분의 준해석적모형에서 위성 헤일로의 초기 위치는 중심 헤일로의 비리얼 반지름이며, 본 연구에서 계산된 결과를 준해석적모형 결과와 비교할 목적을 갖고 있기 때문이다. 계산된 장축 길이, 이심률 그리고 초기 위치가 정해졌으므로 병합 시뮬레이션의 완전한 궤도를 설정할 수 있다. 일반적으로 위성 헤일로의 질량이 중심 헤일로의 질량에 비해 무시될만큼 작으면 환산 질량 좌표계(Reduced Mass Frame)를 사용해서 궤도를 만들 수 있지만, 이번 연구의 경우처럼 위성 헤일로의 질량이 무시할 수 없을 만큼 큰 질량을 갖고 있으면 환산 질량 좌표계를 이용할 수 없다. 좀 더 사실적인 궤도를 제작하기 위해서 질량 중심 좌표계(Center of Mass Frame)를 사용하였다. 이 좌표계는 좌표계의 중심이 두 질량체의 질량 중심이다. 이 때 중심 헤일로와 위

성 헤일로에는 같은 이심률을 갖지만 장축 길이는 서로 다른 값을 갖는다.

$$a_{host} = \frac{m_{sat}}{m_{host} + m_{sat}} a \quad (3.14)$$

$$a_{sat} = \frac{m_{host}}{m_{host} + m_{sat}} a \quad (3.15)$$

질량 중심 좌표계(Center of Mass Frame)에서 결정된 궤도 정보에서 초기 위치를 설정하기 위해서는 아래의 식을 만족하는 각도 θ 를 찾아야 한다.

$$r_{host} = \frac{a_{host}(1 - e^2)}{1 + e \cos(\theta_{host})} \quad (3.16)$$

$$r_{sat} = \frac{a_{sat}(1 - e^2)}{1 + e \cos(\theta_{sat})} \quad (3.17)$$

여기서 초기 위치 r_{host} 와 r_{sat} 의 값은 중심 헤일로의 비리얼 반지름을 사용하기로 했기 때문에 역으로 서로의 거리가 중심 헤일로의 비리얼 반지름만큼 떨어져 있을 때의 각도 $\theta_{host}, \theta_{sat}$ 를 계산해야 한다. 하지만 중심 헤일로의 위치는 위성 헤일로의 위치에 정반대에 있으므로 $\theta_{host} = \pi + \theta_{sat}$ 관계를 만족하기 때문에 위성 헤일로의 각도 θ_{sat} 만 알게 되면 초기 위치를 결정 할 수 있다. θ_{sat} 를 결정하기 위해서 Bisection 방법을 사용해서 수치 적으로 해를 구했다.

다음 과정은 초기 위치가 결정된 궤도에 초기 속도를 설정해주어야 한다. 극 좌표계에서 속도 성분은 중심 방향과 접선 방향으로 나누어 지는데 이 때 각 성분은 아래와 같이 계산된다.

$$\dot{r} = \frac{na}{\sqrt{1 - e^2}} e \sin \theta \quad (3.18)$$

$$r\dot{\theta} = \frac{na}{\sqrt{1 - e^2}} (1 + e \cos \theta) \quad (3.19)$$

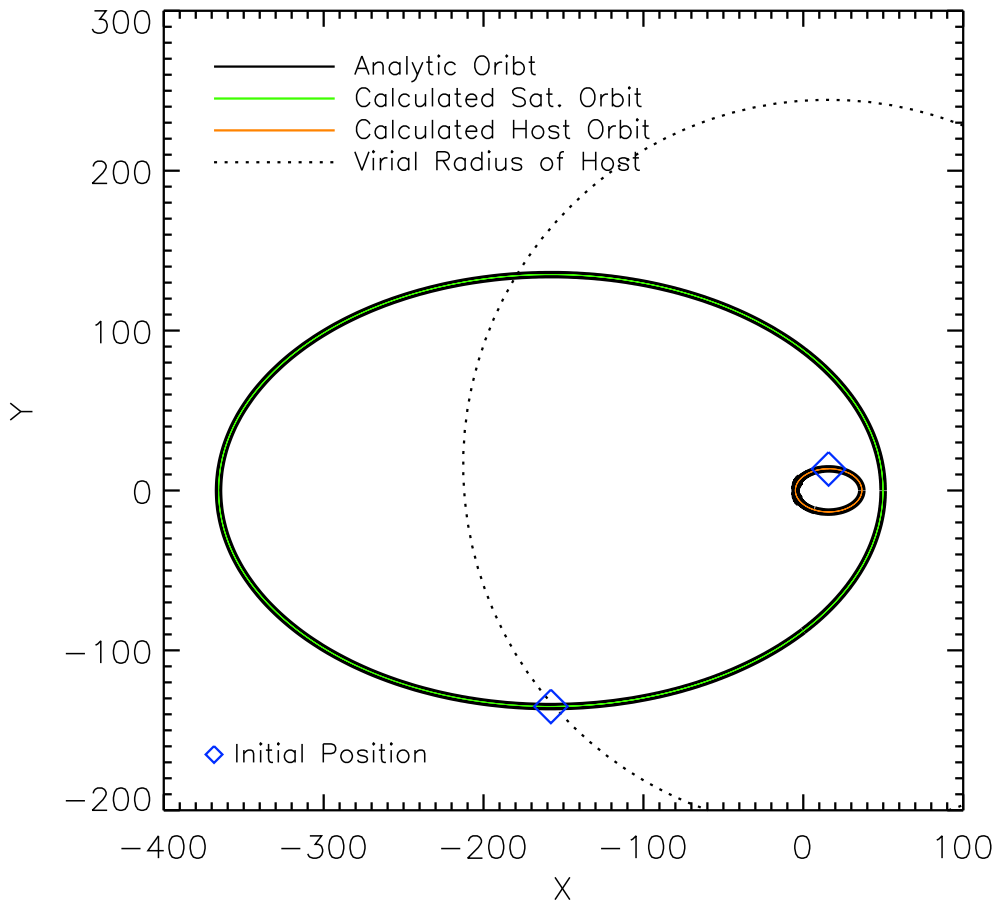


그림 3.4. 이론적 궤도 요소와 계산된 궤도 요소의 비교

검은색 선은 계산된 궤도 요소를 이용해서 그린 타원 궤도, 녹색과 주황색 선은 계산된 초기 위치, 초기 속도를 2체 계산으로부터 얻어진 궤적을 나타낸다. 이때 검은색 선과 녹색, 주황색 선이 일치하고 있는 것을 볼 수 있는데, 계산된 초기 위치와 초기 속도가 정확하게 계산 되었음을 알 수 있다. 점선은 중심 헤일로에 비리얼 반지름을 의미한다. X, Y축의 단위는 Kpc이다.

이 때 평균 움직임(Mean Motion) n 은 아래와 같이 정의된다.

$$n = \sqrt{\frac{G(M_{host} + M_{sat})}{a^3}} \quad (3.20)$$

실제 각 헤일로 속도 V 는 $V^2 = \dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2$ 식을 이용해서 계산된다. 계산된 속도를 다시 직교 좌표계로 표현하기 위해서 위에서 계산된 각도 $\theta_{host}, \theta_{sat}$ 를 이용해서 초기 속도를 설정한다.

병합 시뮬레이션의 궤도를 구한 다음 이를 검증하기 위해서 계산된 초기 위치, 초기 속도, 초기 질량을 이용해서 2체 계산을 사용하였다. 그림 3.4은 검증 결과이다. 검은색 타원 궤도는 위의 방법을 이용해서 계산한 궤도 요소를 이용해서 그린 타원 궤도 이다. 녹색과 주황색 선은 실제 2체 계산을 통해서 얻어진 궤적이다. 녹색과 주황색 선 궤적과 검은색 타원 궤도가 완전히 일치 하고 있기 때문에 실제 계산된 초기 위치, 초기 속도 정보를 확신을 가지고 사용할 수 있다.

2.4 병합 시뮬레이션

본 연구는 GADGET-2 (Springel 2005) 코드를 이용하여 병합 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 연세대학교 천문우주학과에 위치한 12개의 중앙처리장치(CPU)로 구성된 ATOM 병렬 컴퓨터 클러스터를 사용했다. 본 연구에 필요한 모든 시뮬레이션을 수행하는데 총 일주일의 시간이 소요됐다.

시뮬레이션의 결과물들은 약 1억 년의 주기로 150억 년 까지 생성이 된다. 사용된 입자의 개수는 중심 헤일로의 경우 2×10^6 개, 위성 헤일로의 경우 $(M_{sat}/M_{host}) 2 \times 10^6$ 개의 입자를 사용했다. 이는 위성 헤일로를 구성하는 입자의 질량과 중심 헤일로를 구성하는 입자의 질량이 동일한 질량을 가지게 하기 위함이다. 본 연구에서 사용된 입자의 갯수는 최근에 수행된 병합 시뮬레이션(Boylan-Kolchin 2008) 보다 10배 향상된 질량 분해능을 제공한다.

표 3.1과 표 3.2는 수행된 시뮬레이션의 상세한 정보를 알려준다. 수행된 시뮬레이션은 크게 3가지의 중심 헤일로와 위성 헤일로의 밀도 분포의 조합(NH/HH/NN), 6가지

의 서로 다른 질량비(3:1, 5:1, 10:1, 14:1, 20:1, 40:1), 2가지의 서로 다른 궤도 정보($\eta = 0.46, 0.65$)의 조합 총 36개의 조합으로 이루어진다. 여기에 고정된 집중도 지수(Fixed Concentration Index)를 사용하는 경우 그리고 계산된 집중도 지수(Calculated Concentration Index)를 사용하는 경우를 모두 합해서 총 72개의 시뮬레이션을 수행하였다.

2.5 질량 손실 함수

특정 시점의 위성 헤일로의 질량 측정은 모든 시뮬레이션을 수행한 후 병합하고 있는 위성 헤일로의 질량을 측정하기 위해서 중심 헤일로의 대표 위치와 대표 속도, 위성 헤일로를 구성하는 입자들의 에너지 계산을 통해서 속박 여부를 계산했다.

중심 헤일로와 위성 헤일로의 대표 위치와 대표 속도를 정의 하기 위해서 가장 밀도가 높은 입자를 이용하는 방법을 사용했다. 이 때 밀도를 계산하는 방법은 입자 분포를 격자 형태로 나눈 후 격자의 밀도를 측정한 후 각 입자의 위치와 격자의 거리에 따라 특정 가중치를 사용하여 입자들의 밀도를 측정한다. 모든 헤일로 밀도 분포를 보면 중심 부분에서 밀도가 제일 높게 측정 된다. 가장 밀도가 높은 입자의 위치는 중력 에너지가 제일 작은 곳으로 중심 위치를 사용하기 적합하다(Chapter 2). 각 헤일로들을 구성하는 입자들의 밀도를 계산하기 위해서 Triangular-Shaped-Cell(TSC) 알고리즘을 사용했다. TSC 알고리즘은 3차원 공간상에 일정한 크기의 격자를 사용해서 격자 안에 들어오는 입자들의 밀도를 계산한 후 특정 입자의 밀도를 측정하기 위해서 계산된 격자의 밀도를 특정 가중치를 사용해서 계산하는 방법이다. TSC 가중치는 아래와 같이 정의된다.

$$W(x) = \begin{cases} \frac{3}{4} - \left(\frac{x}{H}\right)^2 & |x| \leq \frac{H}{2} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2} - \frac{|x|}{H}\right)^2 & \frac{H}{2} \leq |x| \leq \frac{3H}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.21)$$

이 때 x 는 입자와 격자의 거리를 의미하고, H 는 격자의 크기를 의미한다. TSC 가중

표 3.1. 수행된 시뮬레이션

Model	$M_{host}:M_{sat}$	Circularity η	Profiles
(1)	(2)	(3)	(4)
3b1/3b2/3b1	3:1	0.46	NH/HH/NN
3c1/3c2/3c1	3:1	0.65	NH/HH/NN
5b1/5b2/5b1	5:1	0.46	NH/HH/NN
5c1/5c2/5c1	5:1	0.65	NH/HH/NN
10b1/10b2/10b3	10:1	0.46	NH/HH/NN
10c1/10c2/10c3	10:1	0.65	NH/HH/NN
14b1/14b2/14b3	14:1	0.46	NH/HH/NN
14c1/14c2/14c3	14:1	0.65	NH/HH/NN
20b1/20b2/20b3	20:1	0.46	NH/HH/NN
20c1/20c2/20c3	20:1	0.65	NH/HH/NN
40b1/40b2/40b3	40:1	0.46	NH/HH/NN
40c1/40c2/40c3	40:1	0.65	NH/HH/NN

표의 설명:

- (1) 시뮬레이션의 이름.
- (2) 초기 중심 헤일로와 위성 헤일로의 질량비.
- (3) 초기 각운동량, 원형성(Circularity) η 의 단위로 표현됨.
- (4) 중심 헤일로와 위성 헤일로의 밀도 분포.

N은 NFW 밀도 분포.

H는 Hernquist 밀도 분포. 문자의 첫 문자는 중심 헤일로를 두 번째 문자는 위성 헤일로를 지칭한다.

표 3.2. 사용 한 헤일로 모델의 계산된 집중도 인자(Calculated Concentration Index)

$M_{host}:M_{sat}$	c_{host}	c_{sat}	a_{host} [Kpc]	a_{sat} [Kpc]	ϵ_{host}	ϵ_{sat}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
3:1	7.80	8.71	47.04	30.20	0.22	0.16
5:1	7.80	9.16	47.04	24.56	0.22	0.13
10:1	7.80	9.81	47.04	18.55	0.22	0.11
14:1	7.80	10.16	47.04	16.18	0.22	0.09
20:1	7.80	10.53	47.04	14.00	0.22	0.08
40:1	7.80	11.28	47.04	10.56	0.22	0.07

표의 설명:

- (1) 중심 헤일로와 위성 헤일로의 초기 질량비.
- (2) 중심 헤일로의 집중도 지수(Concentration index).
- (3) 위성 헤일로의 집중도 지수(Concentration index).
- (4) Hernquist 중심 헤일로 밀도 분포일 때 척도 길이(Scale length).
- (5) Hernquist 위성 헤일로 밀도 분포일 때 척도 길이(Scale length).
- (6) 시뮬레이션 상의 중심 헤일로의 경감 길이(Softening length).
- (7) 시뮬레이션 상의 위성 헤일로의 경감 길이(Softening length).

시뮬레이션에서 사용되는 모든 경우에 사용된 중심 헤일로의 질량은 $V_{200} = 160$ km/s 에

해당하는 $M_{host} = 10^{12}M_{\odot}$ 이다.

척도 길이(Scale length) a 는 식 3.7에 의해 계산된 값이다.

치를 계산한 후 3차원 공간 상의 각 입자의 밀도는 아래의 식을 사용한다.

$$\rho_i = \frac{M}{H^3} \sum_{i=1}^{N_p} W(x_i - x_p)W(y_i - y_p)W(z_i - z_p) \quad (3.22)$$

이 때 M은 입자들의 총 질량을 의미하고, x_p, y_p, z_p 는 격자의 중심 점을 의미한다.

TSC 방법을 이용하여 구한 밀도는 격자의 갯수에 민감하게 반응 한다. 본 연구에서는 중심 헤일로와 위성 헤일로를 각각 256³개의 격자로 나누어서 입자의 밀도를 측정하였다. 이를 통해서 구한 가장 밀도가 높은 입자를 찾아냄으로써 그 입자의 위치를 헤일로의 대표 위치로 설정한다. 대표 속도의 경우 수행된 병합 시뮬레이션은 특정 방향으로 움직이게 제작이 되어 있기 때문에 가장 밀도가 높은 입자의 속도를 사용하지 않고, 헤일로의 비리얼 반지름의 30% 안쪽 부분의 입자들의 속도 중심을 대표 속도로 설정한다.

병합하고 있는 위성 헤일로의 질량은 Knebe(2008)가 고안한 그룹 찾기 알고리즘(AHF 알고리즘)을 기반으로 본 연구의 계산에 맞추어 수정된 찾기 알고리즘을 사용했다. 본 연구에서 사용하는 그룹 찾기 알고리즘은 각 입자들의 위치 에너지와 운동 에너지를 계산해서 합이 0보다 작은 입자들을 찾은 후, 이들의 다시 총 에너지를 계산해서 총 에너지가 0보다 작은 입자의 수가 변하지 않을 때까지 반복 수행 하는 것이다. 개략적인 계산 방법은 아래와 같다.

1. 초기 비리얼 질량(M_{vir})과 비리얼 반지름(R_{vir})을 계산한다.
2. ϕ_0 를 계산한다.

$$\phi_0 = G \left(\frac{M_{vir}}{R_{vir}} + \int_0^{R_{vir}} \frac{M(< r')}{r'^2} dr' \right)$$

3. 입자들의 위치 에너지, (ϕ_i)를 계산한다.

$$\phi(r_i) = G \int_0^{r_i} \frac{M(< r)}{r^2} dr - \phi_0$$

4. 입자들의 속도가 탈출 속도(v_{esc})보다 작은 입자들을 선택한다.

$$v_i < v_{esc}(r_i) = \sqrt{2|\phi(r_i)|}$$

5. 속박된 입자를 이용해서 새로운 초기 비리얼 질량(M_{vir})과 비리얼 반지름(R_{vir})을 계산한다.

⇒ 더 이상의 속박된 입자들의 갯수가 변하지 않을 때까지 과정 2-5를 반복해서 수행한다.

제 3 절 결과

병합하고 있는 위성 헤일로 역학적 성질을 이해하기 위해서 모든 시뮬레이션 결과에 대해서 대표 위치와 대표 속도를 정하고, 그룹 찾기 알고리즘을 이용해서 질량 손실량을 측정했다. 그림 3.5-3.7은 중심 헤일로와 위성 헤일로의 다양한 헤일로의 밀도 조합(NH/HH/NN)에 대해서 시간에 따른 중심 헤일로와 위성 헤일로의 상대 거리와 위성 헤일로의 질량 손실 변화를 보여준다. 궤도와 질량비가 같더라도 헤일로의 밀도 조합에 따라 매우 다른 역학적 진화 양상을 보여준다.

3.1 헤일로 밀도 분포의 효과

일반적으로 Λ CDM 우주론에서 암흑 헤일로의 밀도 분포는 NFW 밀도 분포를 갖는다고 알려져 있다(Navarro, Frank and White 1996). NFW 밀도 분포의 경우 $\rho(r) \propto r^{-3}$ 이고, Hernquist 밀도 분포의 경우 $\rho(r) \propto r^{-4}$ 이다. 두 개의 밀도 함수는 비리얼 반지름의 약 20퍼센트인 반경내에서 거의 동일하다. 비리얼 반지름에서 밀도를 비교하면 약 10배정도 차이가 난다(Springel 2005b).

헤일로 밀도 분포가 병합 시뮬레이션의 결과에 어떤 영향을 주는가를 알아보기 위해서 다양한 헤일로 밀도 함수 조합에 대하여(NH/HH/NN) 초기 질량비, $M_{host} : M_{sat} = 10 :$

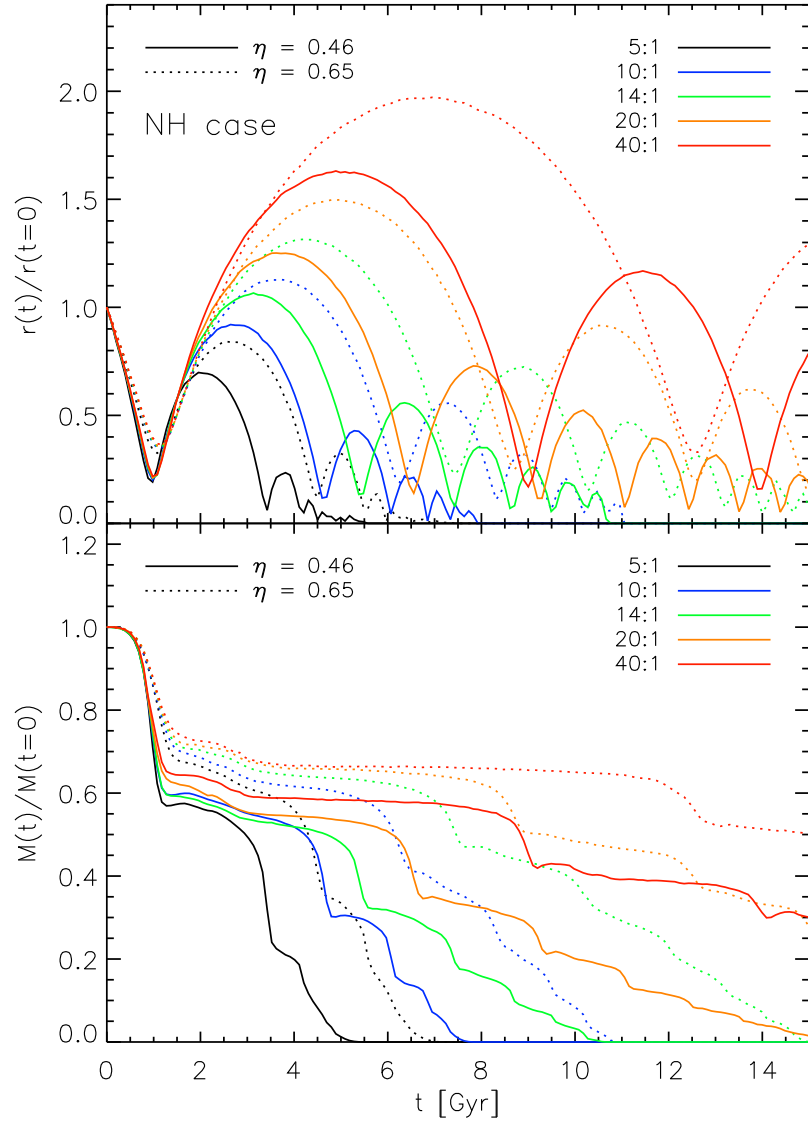


그림 3.5. NFW-Hernquist 조합의 시뮬레이션 결과

각 색깔의 선은 중심 헤일로와 위성 헤일로의 질량비를 의미하고(검은색 - 5:1, 파란색 - 10:1, 초록색 - 14:1, 주황색 - 20:1, 빨간색 - 40:1), 실선의 경우 궤도의 원형성 인자 $\eta = 0.46$ 의 궤도를 점선의 경우 궤도의 원형성 인자 $\eta = 0.65$ 를 의미한다. 위의 그래프는 각 시간 별 중심 헤일로와 위성 헤일로의 거리를 나타내고, 아래의 그래프는 각 시간 별 위성 헤일로의 질량 손실 함수를 의미한다.

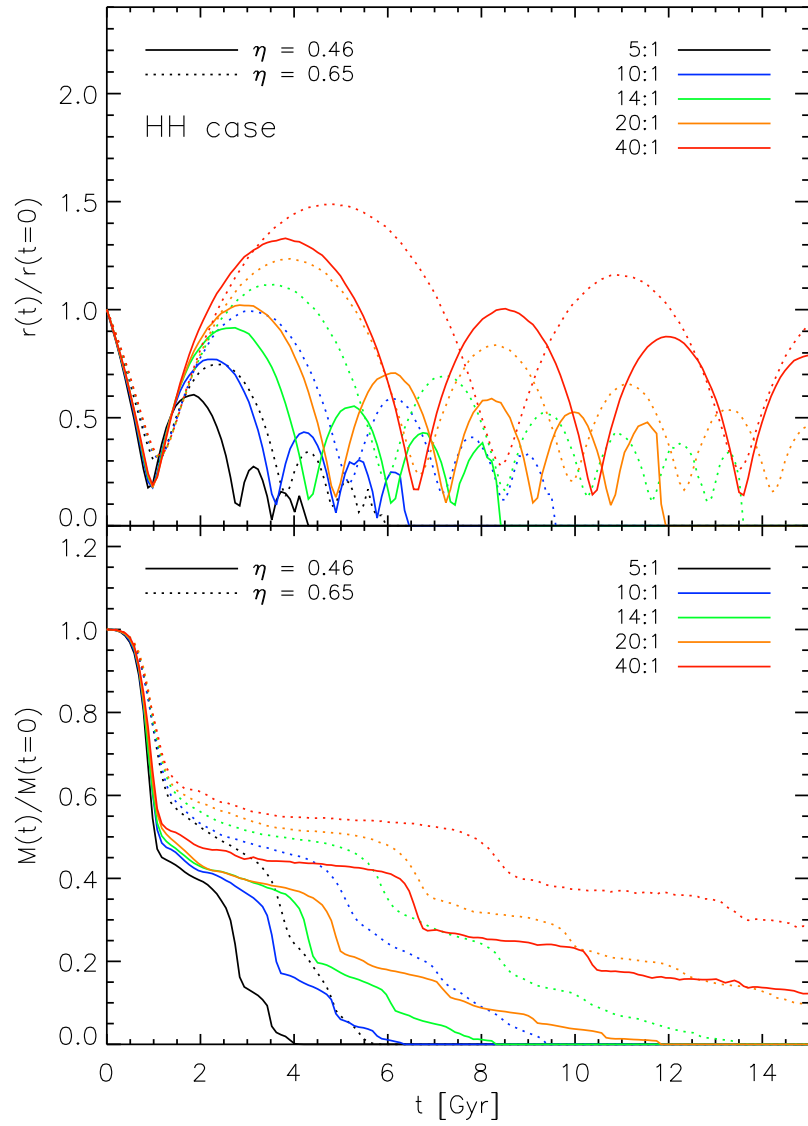


그림 3.6. Hernquist-Hernquist 조합의 시뮬레이션 결과

그림 3.5와 같지만, Hernquist-Hernquist 조합의 결과

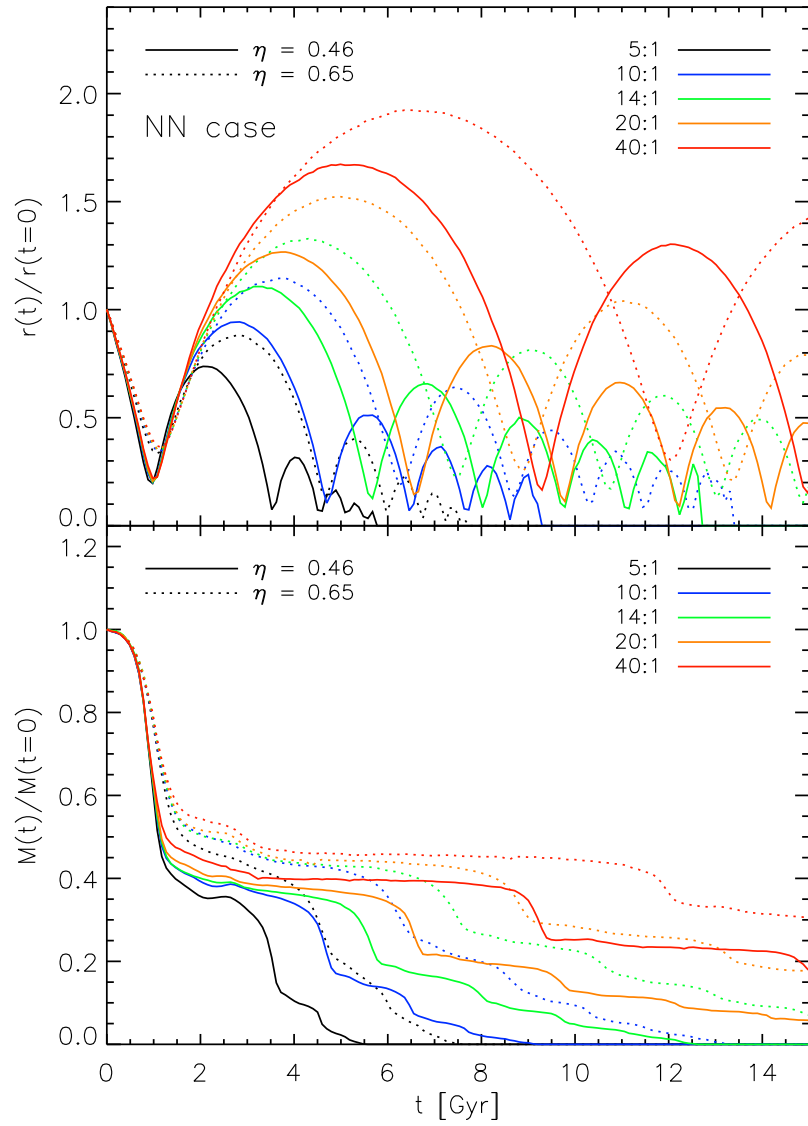


그림 3.7. NFW-NFW 조합의 시뮬레이션 결과

그림 3.5와 같지만, NFW-NFW 조합의 결과

1, 원형성 인자, $\eta = 0.46$ 인 모델에 대한 계산을 수행 하였다. 그림 3.8 은 헤일로 밀도 분포의 조합을 달리 했을 때 질량의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 검은색 선은 NFW-Hernquist 조합, 하늘색은 Hernquist-Hernquist 조합 그리고 주황색 선은 NFW-NFW 조합을 의미한다. 같은 병합 조건 하에 수행된 시뮬레이션임에도 불구하고 질량 변화 양상은 매우 다르다. 각 병합시간은 NFW-Hernquist 조합은 78억년, Hernquist-Hernquist 조합은 64억년 그리고 NFW-NFW 조합은 94억년이다. NFW 밀도 분포와 Hernquist 밀도 분포의 경우 비슷한 집중도를 가지는 헤일로 모델임에도 불구하고 질량 손실 함수는 상당히 다른 모습을 보여주고 있다. 이는 역학적 마찰력의 영향으로 서로 다른 밀도 함수를 사용했을 때, 헤일로의 역학적 진화 모습을 결정한다. 향후 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 진화를 설명하기 위해서는 헤일로 밀도 분포 조합에 따라 다른 방향을 제시해야 한다.

3.2 집중도 인자의 효과

기존 연구에서 사용된 집중도 인자는 고정된 값을 이용해왔다. 이는 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 진화보다는 모델을 만드는 과정에서 집중도 인자에 무관한 질량 손실 함수를 만들었기 때문이다. 하지만 집중도 인자는 헤일로의 밀도 분포의 모양을 결정하는 중요한 인자로서 헤일로의 질량과 집중도 인자간의 상관 관계가 알려져 있다(식 3.5). 집중도 인자가 병합 시뮬레이션의 결과에 어떤 영향을 주는지 보기 위해서 앞서 수행했던 방식과 동일하게 동일한 병합 조건에서 고정된 집중도 인자를 사용한 경우와 계산된 집중도 인자를 사용한 경우를 비교하였다. 고정된 집중도 인자를 사용한 모델의 경우 중심 헤일로의 집중도 인자 $c = 5$, 위성 헤일로의 경우 $c = 10$ 로 하였다. 계산된 집중도 인자를 사용할 경우 각 헤일로의 질량에 따른 집중도 인자를 식 3.5로부터 계산하여서 사용하였다.

그림 3.9는 집중도 인자에 따른 질량 손실 함수를 보여준다. 같은 질량비를 가지는 병합 시뮬레이션 결과에서 집중도 인자는 질량 손실의 양을 결정하는데 큰 역할을 한다. 원형성 인자 $\eta = 0.46$ 인 궤도의 경우, 고정된 집중도 인자를 사용하면 근지점을 지날 때마다 질량의 약 30% 정도를 잃는 반면, 계산된 집중도 인자를 사용한 집단에서는 약 40% 정도를 잃는다. 또한 고정된 집중도 인자를 사용하면 원래 헤일로의 집중도 정도보다 초과해서 중심부분에 집중 되어 있다면 위성 헤일로로는 좀 더 오랫동안 자신의 핵을 유지 시키면

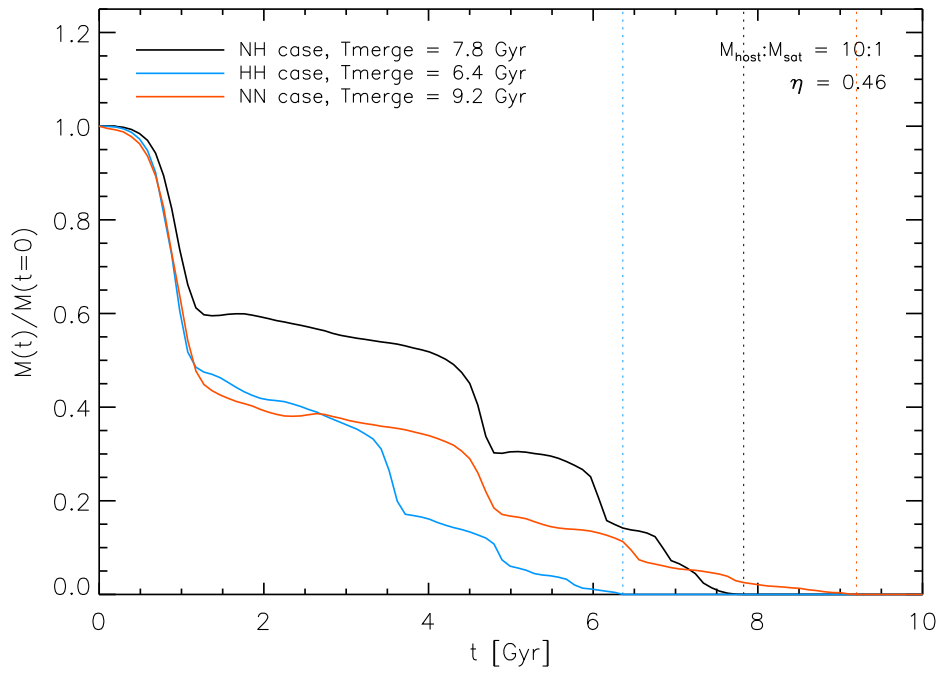


그림 3.8. 헤일로 밀도 분포의 조합에 따른 질량 손실 함수

검은색 선은 NFW-Hernquist 조합, 하늘색 선은 Hernquist-Hernquist 조합 그리고 주황색 선은 NFW-NFW 조합을 의미한다. 세로 점선은 각 조합의 병합 시간을 나타내고 있다.

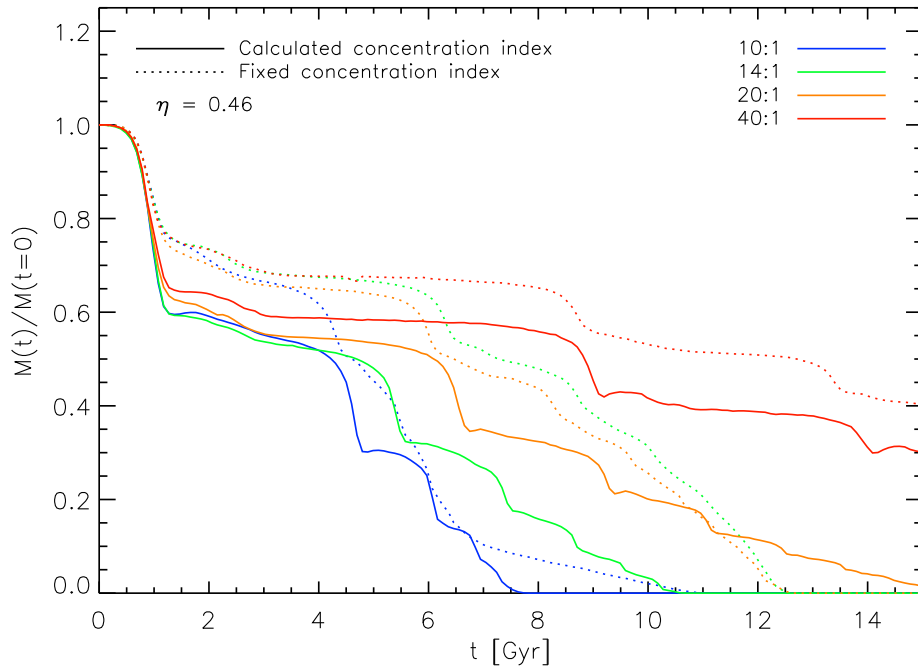


그림 3.9. 집중도 인자(Concentration Index)에 따른 질량 손실 함수

실선은 계산된 집중도 인자를 사용한 경우, 점선은 고정된 집중도 인자를 사용한 시뮬레이션 결과 이다. 각 색이 의미하는 것은 초기 질량비를 의미한다(파란색 10:1, 녹색 14:1, 주황색 20:1, 빨간색 40:1). 고정된 집중도 인자의 경우 중심 헤일로는 5를 가지고 위성 헤일로는 10을 가진다. 계산된 집중도 인자의 경우 헤일로의 질량에 따른 집중도 인자를 가지게 된다(식 3.5). 집중도 인자에 따라 병합 시간 질량 손실 비율까지 달라지는 현상을 볼 수 있다.

서 중심 헤일로 주변을 공전한다.

기존에 사용했던 고정된 집중도 인자를 사용하는 경우 같은 헤일로의 따라 좀더 집중된 헤일로가 형성될 수 있고 좀더 성긴 헤일로가 형성될 수 있다. 결과 표본의 균질성을 위해서 적정 집중도를 갖는 헤일로 모델을 사용한 결과를 이용해야 한다.

제 4 절 준해석적모델에 적용

현재까지 준해석적모델에서 병합하고 있는의 위성 헤일로의 질량 손실 부분은 해석적 방법에 기반하여 역학적 마찰력과 조석력을 단순한 근사식을 이용해서 질량 손실을 계산하고 있는 한계를 가지고 있다. 좀더 사실적인 질량 손실을 계산하기 위해서 다체 시뮬레이션 결과를 기준으로 새로운 모형과 비교를 했다.

4.1 해석적 질량 손실 계산 모델

해석적 방법으로 질량 손실량 계산은 2체 문제를 바탕으로 한다. 이 때 중심 헤일로와 위성 헤일로는 점입자로 가정하여 중력을 계산한다. 하지만 단순히 점 입자로 가정해서 2체 계산을 수행하게 되면 안정된 궤도를 갖고 공전하며 병합하지 않는다. 이를 막기 위해서 역학적 마찰력이 고려된다. 역학적 마찰력은 한 점입자가 매질속으로 들어갈 때 매질들에 의해 점입자는 운동을 방해 받게 된다. 이로 인한 속도 변화는 다음과 같다.

$$\frac{d\mathbf{v}_M}{dt} = -\frac{4\pi \ln \Lambda G^2 \rho M}{v_M^3} \left[\text{erf}(X) - \frac{2X}{\sqrt{\pi}} e^{-X^2} \right] \mathbf{v}_M, \quad X \equiv v_M/(\sqrt{2}\sigma) \quad (3.23)$$

대부분의 준해석적모델에서 사용되는 궤도는 1차원 계산을 사용한다. 이때의 궤도는 역학적 마찰력에 의해서 장축의 길이가 점차 줄어들게 된다. 그러나 병합 시뮬레이션 계산 결과에서 궤도는 2차원 형태를 갖게 된다. 좀 더 사실적인 계산을 위해서 기존에 사용되는 1차원적인 궤도 계산을 2차원 평면상에서 계산하는 방법을 도입하였다. 이를 위해서 기존에 방사상 성분만을 고려하는 것이 아닌 직교좌표계내에서 X, Y 방향의 가속도를 계산함으로써 2차원 평면위에서 궤도를 계산하게 된다. 중력 계산을 위해서 기존의 Leap-

Frog 알고리즘이 아닌 이 보다 계산 효율과 정확도가 증가한 KDK(Kick-Drift-Kick) 알고리즘(Quinn 1997)을 사용했다. Leap-Frog 알고리즘에서는 다음 단계의 위치와 속도를 계산하기 위해서 아래와 같은 식을 사용한다.

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_{n+1/2} &= \mathbf{r}_n + \frac{1}{2}\tau\mathbf{v}_n, \\ \mathbf{v}_{n+1} &= \mathbf{v}_n + \tau\mathbf{a}(\mathbf{r}_{n+1/2}), \\ \mathbf{r}_{n+1} &= \mathbf{r}_{n+1/2} + \frac{1}{2}\tau\mathbf{v}_{n+1}, \\ \tau &= \text{timestep}\end{aligned}$$

다음 단계의 속도를 계산할 때 이전 단계의 가속도와 위치를 기준으로 재계산후, 재계산된 속도로 다음 단계의 위치를 재계산하게 된다. Leap-Frog 알고리즘의 경우 코드 내에 이식이 쉽다는 장점이 있지만 시간 분해능이 고정되어 있어서 움직임에 민감한 부분에서 큰 오차를 발생한다. 이와 달리 KDK 알고리즘은 Kick 계산과 Drift 계산 시 고정된 시간 간격을 쓰지 않고 입자들이 받는 힘의 크기에 따라서 변하는 시간 간격으로 계산 되므로 높은 정확도와 적은 계산 비용을 가진다. KDK 알고리즘의 경우 아래와 같은 식을 사용한다.

$$\begin{aligned}K(\tau) &= \mathbf{r}'_t + \mathbf{p}' \int_t^{t+\tau} \frac{dt}{a^2}, \\ D(\tau) &= \mathbf{p}' - \nabla' \phi' \int_t^{t+\tau} \frac{dt}{a}, \\ \tau &= \text{timestep} < \frac{\eta}{\sqrt{G\rho_0}}\end{aligned}$$

위의 식에서 \mathbf{p} 는 운동량을 의미 하고, η (앞서 원형성 인자와 다름) 는 계산의 안정성과 정확도를 나타내는 상수이다.

해석적인 방법으로 병합하고 있는 기술할 때 필요한 것은 병합하고 있는 위성 헤일로 의 질량 손실량을 계산하는 것이다. 이를 위해서 먼저 중심 헤일로가 미치는 중력권에 대한 이해가 필수적이다. 중심 헤일로가 미치는 중력권을 설명하기 위해 사용하는 두가지 물리적 성질은 영향권 반지름(Sphere-of-Influence Radius)과 조석 반지름(Tidal Radius)로

서 아래와 같이 정의 된다.

$$r_{soi} \simeq a \left[\left(\frac{M_{sat}}{M_{host}} \right)^{-0.4} (1 + 3 \cos^2 \theta)^{0.1} + \frac{2}{5} \cos \theta \left(\frac{1 + 6 \cos^2 \theta}{1 + 3 \cos^2 \theta} \right) \right]^{-1} \quad (3.24)$$

$$r_{tidal} = \left(\frac{M_{sat}}{2M_{host}} \right)^{1/3} r_{fric} \quad (3.25)$$

헤일로 입자들이 영향권 반지름(r_{soi}) 혹은 조석 반지름(r_{tidal}) 안에 있을 경우 외부의 힘이 작용한다고 해도 내부의 입자들은 헤일로 영향권에서 벗어날 수 없다. 섭동체와 가까울수록 두 개의 반지름(r_{soi}, r_{tidal}) 모두 줄어들게 된다. 이 때 두 개의 반지름 바깥에 있는 헤일로 입자들은 외부의 힘에 의해 떨어져 나갈 수 있게 되는데 이를 질량 손실이라고 한다. 이 때 계산 되는 질량 손실은 원래의 위성 헤일로의 질량에서 영향권 반지름 안에 있는 질량의 차이가 특정 비율로 빠져 나가게 된다. 이 때 계산된 질량 손실은 아래와 같다.

$$dM_{sat} = (M_{sat} - M_{soi}) \times dt_{char}, \quad (3.26)$$

$$dt_{char} = \frac{dt}{t_{cross}} \quad (3.27)$$

여기에서 dt 는 궤도 계산 할 때 시간 간격을 나타내며, t_{cross} 는 특정 물질 내에 물체가 이동할 수 있는 시간 척도를 나타내는 통과 시간을 의미한다. 이때 통과 시간 t_{cross} 는 아래와 같이 정의된다.

$$t_{cross} = \alpha \frac{\sqrt{2}M_{half}}{V_c} \quad (3.28)$$

이때 M_{half} 는 특정 시점에서 위성 헤일로 질량의 반을 의미하고, V_c 는 특정 시점에서 위성 헤일로의 비리얼 속도를 의미한다. 만약 우리가 등온 헤일로(Isothermal Halo)를 사

용할 경우 자유 상수 $\alpha = 1$ 이다. 하지만 NFW 밀도 분포는 등은 헤일로에서 유도 된 것이 아니고 현재까지 알려진 온도 함수가 없기 때문에 계산된 자유 상수 α 의 값을 정해야 한다.

4.2 해석적 계산과 다체 시뮬레이션과의 비교

해석적 계산에서 질량 손실량을 계산할 때 사용되는 상수를 결정하기 위해서 다체 시뮬레이션 결과의 평균 질량 손실량을 이용했다. 다체 시뮬레이션 결과로부터 평균 질량 손실량을 구하기 위해서 무작위로 100개의 원형성 인자 η 를 선택하고, 병합 시뮬레이션 역시 무작위로 100개의 원형성 인자 η 를 선택한 후 계산을 수행했다. 이 때 중심 헤일로와 위성 헤일로의 초기 밀도 분포는 NFW 모델을 이용하여 구하였다. 한 개의 병합 시뮬레이션의 수행 시간은 대략 적으로 한 대의 컴퓨터에서 5시간의 소요가 된다. 많은 양의 시뮬레이션을 처리하기 위해서 한국천문연구원의 20여개의 중앙처리장치를 가지고 있는 병렬 컴퓨터 클러스터를 이용하였다. 100개의 병합 시뮬레이션으로부터 각각 다른 궤도를 가질 때의 질량 손실량을 구한 다음 평균 질량 손실량을 도출했다.

해석적 모델 역시 선택된 100개의 η 에 대해서 질량 손실량을 구한 다음 이를 평균 질량 손실량을 도출했다. 이 때 정해지지 않은 자유 상수 α 를 결정 하기 위해서 $0.1 < \alpha < 1.0$ 영역에서 0.1 간격으로 총 10개의 해석적 계산을 수행하였다. 해석적 계산을 위해서 사용된 코드는 연세준해석적모델(ySAM; Kimm, Yi & Khochfar, in prep.)에서 사용되는 부분을 중심 헤일로의 밀도 분포를 NFW 밀도 분포로 수정한 것이다.

그림 3.10 는 해석적 계산과 다체 시뮬레이션으로부터 얻은 평균 질량 손실 함수를 보여주고 있다. 그림 3.10 에서 회색의 영역은 자유 상수 $0.1 < \alpha < 1.0$ 까지 계산된 질량 손실 함수의 영역을 보여주고 있다. 다체 시뮬레이션으로부터 얻은 평균 질량 손실 함수를 자유 상수 $\alpha = 0.4$ 일 때 평균 질량 손실 함수가 약 100억년까지 그 흐름을 맞추고 있는 모습을 볼 수 있다. 우주의 나이를 130억 년이라고 하고, 앞 서 2장에서 수행한 우주적인 시뮬레이션 결과로부터 이완 된 헤일로가 생성되는 시점이 약 10억 년 일 때, 현재 우리가 살고 있는 우주의 시간 내에서 질량 손실을 비교적 정확하게 맞추고 있다.

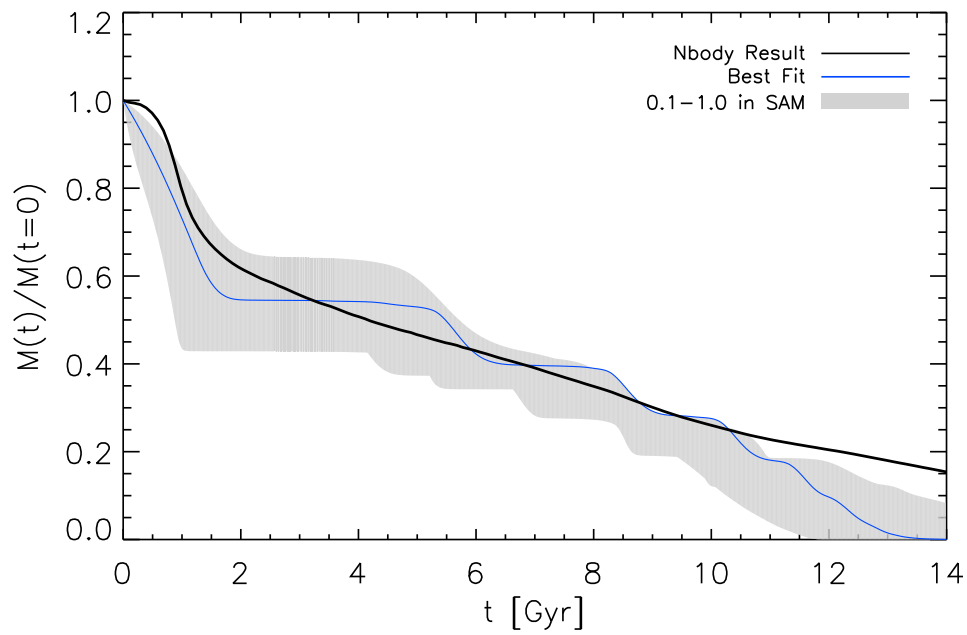


그림 3.10. 다체 시뮬레이션 결과와 해석적 방법과의 평균 질량 손실 함수 비교

회색부분 영역은 자유 상수 $0.1 < \alpha < 1.0$ 의 평균 질량 손실 함수의 영역을 의미한다. 검은색 실선은 다체 시뮬레이션으로부터 얻은 평균 질량 손실 함수이다. 회색 실선은 해석적 계산 결과로 자유 상수 $\alpha = 0.4$ 에 해당하는 평균 질량 손실 함수이다.

제 5 절 토의 및 결론

정상 우주론에서 우리 우주는 수많은 병합을 통해서 작은 구조물에서 큰 구조물을 형성한다. 수치 시뮬레이션과 관측 결과를 통해 병합하고 있는 위성 헤일로로는 오랜 시간 동안 자신의 구조를 유지한다(Klypin et al. 1998, Moore et al. 1999a). 은하 진화를 이해하기 위해서 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 이해는 필수적임에도 기존의 연구는 해석적 방법을 기반으로 역학적 마찰력과 조석력을 단순한 근사식을 이용하고 있기 때문에 위성 헤일로의 역학적 진화를 설명하기에 부족하다(Lecey & Cole 1993, Velázquez & White 1999, Taylor & Babul 2001, 2004).

본 연구는 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 진화를 보다 깊이 이해하고, 이를 이용하여 해석적 모델에 적용하는 방법을 구현하는 것을 목표로 하여 기존 연구보다 더 높은 질량 분해능을 이용한 수치 시뮬레이션을 사용했다. 본 연구에서 사용한 헤일로 모델은 지금까지 일반적으로 사용한 등온 헤일로가 아닌 전 우주적으로 암흑 헤일로의 밀도 분포를 맞출 수 있는 NFW 밀도 분포(식 3.1)와 비리얼 반지름 내에서 NFW 밀도 분포 유사한 밀도 분포를 가지는 Hernquist 밀도 함수(식 3.6)이다. 이를 통해서 기존의 연구보다 깊이 있게 위성 헤일로의 역학적 진화를 연구하였다. 기존의 연구에서 헤일로 밀도함수의 모양을 결정하는 집중도 인자는 헤일로의 규모에 관계없이 고정된 값을 사용했다. 다체 시뮬레이션으로부터 헤일로의 질량과 집중도 인자 간의 상관 관계가 알려졌다(Neto 2007). 사실적인 모델 구현을 위해서 고정된 집중도 인자를 대신해서 식 3.5를 이용해서 사용하는 헤일로의 질량에 적합한 집중도 인자를 사용했다.

병합하고 있는 중심 헤일로와 위성 헤일로의 궤도는 환산 질량 좌표계를 대신해서 질량 중심 좌표계를 사용하여 계산하였다. 병합 시뮬레이션에서 위성 헤일로의 질량이 중심 헤일로의 질량에 비해 무시할 만큼 작다면 환산 질량 좌표계를 사용해도 무방하지만 본 연구에서와 같이 3:1, 5:1과 같이 위성 헤일로의 질량이 매우 큰 경우 많은 오차를 발생하기 때문에 본 연구는 질량 중심 좌표계를 사용했다.

병합 시뮬레이션으로부터 중심 헤일로와 위성 헤일로의 밀도 분포의 종류에 따라서 역학적 성질이 달라진다는 사실을 발견했다(그림 3.5-그림 3.7). 서로 다른 조합의 밀도 분포를 사용한 병합 시뮬레이션의 결과에서 위성 헤일로의 병합 시간 뿐 아니라 질량 손실 양

상이 다르다는 사실을 알아냈다(그림 3.8).

준해석적모델에서 사용되는 질량 손실 계산 법은 상당히 제한적이고 정확하지 않다. 준해석적모델에 질량 손실 계산 방법을 적용하기 위해서 본 연구의 다체 시뮬레이션으로부터 얻은 결과를 준해석적모델에 적합하도록 조절을 했다. 준해석적모델에 사용되는 질량 손실 함수는 NFW-NFW 밀도 분포 조합을 사용했다. 준해석적모델에서 사용하는 질량 손실 함수는 역학적 마찰력을 이용한 2차원적 궤도 계산과 함께 잃어버리는 질량은 영향권 반지름과 비리얼 반지름을 이용해서 질량 손실을 계산했다(식 3.26). 이 과정에서 t_{cross} 를 계산하는 과정에서 NFW 밀도 분포를 이용할 경우 자유 상수가 도입된다. 자유 상수 α 를 도입 하기 위해서 100개의 무작위 원형성 인자 η 를 선택해서 수치 시뮬레이션의 평균 질량 손실과 해석적 방법을 이용한 평균 질량 손실을 비교했다. 이 때 자유 상수가 $\alpha = 0.4$ 일 때, 수치 시뮬레이션의 평균 질량 손실을 잘 맞춘다.

제 4 장

정리

제 1 절 결론

본 연구는 수치 시뮬레이션 결과를 바탕으로 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 요소 변화와 헤일로가 위치하고 있는 주변 환경에 따라 병합 양상의 변화를 조사하였고, 우주론적 시뮬레이션에서 발생하는 병합 환경을 고분해능 수치 시뮬레이션을 이용해서 위성 헤일로의 역학적 성질을 세밀 하게 살펴보았다.

병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보 분포를 알아보기 위해 512^3 개의 암흑 물질로 이루어진 우주론적 다체 시뮬레이션을 수행하였다. 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보는 위성 헤일로의 초기 위치와 속도에 매우 민감하다. 기존 연구에 서는 위성 헤일로의 초기 위치, 속도를 보정하는 과정에서 단순한 중력 계산을 사용 했지만(Benson 2005), 본 연구는 보다 사실적인 궤도 요소 분포를 얻기 위해서 역학적 마찰력을 이용한 보정 법을 사용했다. 이 보정 방법은 다체 시뮬레이션 결과에서 위성 헤일로의 위치가 중심 헤일로의 비리얼 반지름 안쪽에 있을 때 매우 효과적이다. 병합이 이미 진행된 상태에서 잃어버린 선형운동량과 각운동량을 역학적 마찰력 계산을 통해서 어느 정도 회복 시킬 수 있다. 병합 후보를 찾는 방법은 병합 계층 구조를 사용해서 헤일로 연결 고리를 찾은 후 실제 위성 헤일로가 중심 헤일로로 병합되는 헤일로를 찾아서 궤도 요소를 구했다.

다양한 시간에 따른 위성 헤일로 의 궤도 요소 확률 분포 함수로부터 병합 시간에 따라 다르게 진행된다는 사실을 발견했다. 이심률과 원형성 인자 확률 분포와 방사상 속도-접선 속도 분포를 통해서 과거의 우주에서 보다 포물선에 가까운 궤도를 갖으며 보다 적은 각운동량 값을 가지고 병합 하게 된다. 진입 속도 확률 분포와 중심 헤일로와 위성 헤일로의 질량비 확률 분포를 통해 과거의 우주에서 병합이 보다 격렬하게 진행 되었다는 사실을 알 수 있다.

헤일로가 속해 있는 주변 환경이 병합 방법에 영향을 준다. 헤일로가 속해 있는 주변 환경을 정의하기 위해서 적색편이에 따른 Press-Schechter 질량 함수의 M_* 를 이용했다. 과거의 우주일수록 중심 헤일로의 질량이 M_* 보다 큰 집단보다 M_* 보다 작은 집단에서 더 큰 진입 속도와 더 많은 각운동량을 가지고 병합이 이루어진다.

전체 우주 규모에서 발생하는 병합 양태를 확인 후 각 병합에 대해서 위성 헤일로의 역학적 진화를 연구했다. 병합에 대해서 위성 헤일로의 역학적 진화를 연구하기 위해서 고질량 분해능 수치 시뮬레이션을 사용했다. 다양한 헤일로 밀도 분포를 통해서 헤일로 모델을 만든 후 수치 시뮬레이션을 수행 하였다. 보다 사실적인 병합 초기 위치와 속도를 설정하기 위해서 환산 질량 좌표계를 대신해서 질량 중심 좌표계를 사용하여 위성 헤일로의 역학적 변화 모습을 조사하였다. 본 연구에서 사용한 헤일로 밀도 분포는 NFW 밀도 분포와 Hernquist 밀도 분포이다. 다양한 조합의 밀도 분포를 사용했을 때 위성 헤일로의 역학적 진화 모습이 다르다는 사실을 발견했다. 향후 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 모습을 기술하기 위해서는 헤일로의 밀도 분포에 따라 다른 방법으로 기술해야 한다. 헤일로 밀도 함수에서 밀도 분포의 형태에 영향을 주는 집중도 인자는 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적 진화에 영향을 주는 중요한 상수이다. 기존 연구에 서는 헤일로의 규모에 관계없이 고정된 값을 사용했다. 본 연구는 보다 사실적인 위성 헤일로의 역학적 진화 모습을 관찰하고자 계산된 집중도 인자를 사용했다.

준해석적모델에서 사용하는 질량 손실 계산 방법을 개선하고자 수치 시뮬레이션을 기준으로 좀 더 사실적인 계산 방법을 고안했다. 기존 연구의 준해석적모델에서 사용하는 궤도는 1차원적으로 계산한다. 이를 2차원 공간에서 중심 헤일로와 위성 헤일로의 위치를 계산하는 방법을 사용했다. 질량 손실 함수 계산 방법은 역학적 마찰력, 영향권 반지름과

비리얼 반지름을 이용한 계산 방법을 사용했다. 실제 등은 헤일로로 경우 t_{cross} 값을 정확하게 계산할 수 있지만 NFW 헤일로로 경우에는 자유 상수 α 를 도입하여 t_{cross} 를 계산하였다. 해석적 질량 손실 함수 수치 시뮬레이션의 질량 손실 함수를 비교하기 위해서 무작위로 100개의 원형성 인자를 선택해서 각 평균 질량 손실 함수를 비교했다. 이 때 자유 상수가 $\alpha = 0.4$ 일 때, 수치 시뮬레이션의 평균 질량 손실을 잘 맞춘다.

제 2 절 연구의 취약점

본 연구의 모든 결과는 암흑 물질만을 이용한 다체 시뮬레이션 결과를 사용한 것이다. 암흑 물질만을 사용할 경우 입자간의 충돌이 없는 것으로 가정하고 단순한 중력 계산만으로 헤일로의 역학적 진화를 조사한다. 실제 우리가 살고 있는 우주에는 암흑 물질 뿐 아니라 훨씬 복잡하게 상호 작용하는 바리온 입자가 존재 한다. 바리온 입자를 병합 과정에 포함하게 되면 본 연구에서 얻은 결과와 상당히 다른 양상을 갖게 될 것이다.

제 3 절 후속 연구

2장의 연구는 다양한 적색편이에서 병합하고 있는 위성 헤일로 궤도 정보의 분포를 연구함으로써 병합의 경향 성을 확인하는 것에 그 주안점을 두었다. 준해석적모델에서 요구하는 사항은 경향 성이 있다는 사실보다 수량 적으로 계산된 확률 분포나 특정 함수를 필요로 한다. 이를 위해서 다양한 궤도 요소의 조정 함수(Fitting Function)가 다양한 변수 공간에서 필요하다. 또한 새롭게 얻은 궤도 요소의 조정 함수를 준해석적모델에 적용했을 때 선행 연구에서 만족하는 여러 물리적 현상을 만족 시켜주는 것과 동시에 좀 더 사실적인 은하 형성과 진화 모델을 취할 수 있는지의 여부를 확인해야 한다. 현재 2장의 연구에서 사용한 입자의 수는 512^3 개로써 현재 학계에서 발표되는 질량 분해능보다 좋지 못하다. 향후 보다 좋은 질량 분해능을 이용한 다체 시뮬레이션을 통해서 병합하고 있는 위성 헤일로의 궤도 정보 분포를 연구하고자 한다. 또한 위성 헤일로의 위치와 속도 보정 과정에서 기존 연구와 달리 역학적 마찰력을 도입함으로써 보다 사실적인 위성 헤일로의 궤도 정보를 얻었지만 질량 손실은 고려되지 않은 방법을 사용하고 있다. 후속 연구는 3장

4.2절에서 수행한 연구를 바탕으로 질량 손실이 고려된 위성 헤일로 위치와 속도 보정 방법을 사용해야 할 것이다.

3장의 연구는 다체 시뮬레이션에서 많은 수의 병합이 발생하는데 이 때 고질량 분해능 다체 시뮬레이션(High-Resolution N-body Simulation)을 통해서 병합하고 있는 위성 헤일로의 역학적인 성질을 보다 자세히 연구하는 것에 그 주안점을 두었다. 기존의 준해석 모델에서 사용하는 질량 손실 함수는 매우 제한적일 뿐만 아니라 다체 시뮬레이션의 결과와 상당한 차이를 보인다. 향후 본 연구에서 도출한 질량 손실 함수를 구하는 해석적 방법을 준해석모델에 이식함으로써 은하 형성과 진화 모델에서 어떤 점을 향상시킬 수 있는지 확인해야 한다. 본 연구에서 사용하는 병합 시뮬레이션은 헤일로만을 이용한다. 보다 사실적인 위성 헤일로의 질량 손실 함수를 도출 하기 위해서 향후 연구는 최소한 헤일로+팽대부+원반 은하 이렇게 3개로 구성된 계를 사용한 결과를 도출 해야 한다.

궁극적으로는 본 연구 2장, 3장의 결과를 바탕으로 다양한 적색편이에서 위성 헤일로의 궤도 정보를 이용하고 새롭게 고안된 해석적 질량 손실 함수를 다양한 변수 공간에서 손쉽게 질량 손실 함수를 계산 하는 새로운 방법이 연구 되어야 한다.

참고 문헌

- [1] Benson A. J., Frenk C. S., Baugh C. M., Cole S., Lacey C. G., 2001, MNRAS, 327, 1041
- [2] Benson A. J., Lacey C. G., Freck C. S., Baugh C. M., Cole S., 2004, MNRAS, 351, 1215
- [3] Benson A. J., 2005, MNRAS, 358, 551
- [4] Binney J., Tremaine S., 1987, Galactic Dynamics, Princeton Univ. Press, Princeton, NJ
- [5] Boylan-Kolchin M., Ma C. -P., Quataert E., 2008, MNRAS, 383, 93
- [6] Chiba M., 2002, ApJ, 565, 17
- [7] Davis M., Efstathiou G., Frenk C. S., White S. D. M., 1985, ApJ, 292, 371
- [8] Dekel A. et al., 2009, Nature, 457, 22
- [9] Diemand J., Moore B., Stadel J., 2004, MNRAS, 352, 535
- [10] Fellhauer M., Lin D. N. C., 2007, MNRAS, 375, 604
- [11] Gao L. White S. D. M. Jenkins A., Stoehr F., Springel V., 2004, MNRAS, 355, 819
- [12] Ghigna S., Moore B., Governato F., Lake G., Quinn T., Stadel J., 1998, MNRAS, 300, 146

- [13] Gill S. P. D., Knebe A., Gibson B. K., 2004, MNRAS, 351, 399
- [14] Gnedin O. Y., 2003a, ApJ, 582, 141
- [15] Gnedin O. Y., 2003b, ApJ, 589, 752
- [16] Hayashi E., Navarro J. F., Taylor J. E., Stadel J., Quinn T., 2003, ApJ, 584, 541
- [17] Hernquist L., 1990, ApJ, 356, 359
- [18] Hernquist L., 1993a, ApJS, 86, 389
- [19] Hockney R. W., Eastwood J. W., 1988, Computer Simulation Using Particles, IOP Publishing Ltd., New York, NY
- [20] Huang S., Carlberg R. G., 1997, ApJ, 480, 503
- [21] Kimm T. et al., 2009, MNRAS, 394, 1131
- [22] Dalal N., Kochanek C. S., 2002, ApJ, 572, 25
- [23] Lecey C. G., Cole S., 1993, MNRAS, 262, 627
- [24] Lokás E. L., Mamom G. A., 2001, MNRAS, 321, 155
- [25] Longair M. S., Galaxy Formation Second Edition, 2007, Springer, Berlin
- [26] Mayer L., Governato F., Colpi M., Moore B., Quinn T., Wadsley J., Stadel J., Lake G., 2001a, ApJ, 547, L123
- [27] Mayer L., Governato F., Colpi M., Moore B., Quinn T., Wadsley J., Stadel J., Lake G., 2001b, ApJ, 559, 754
- [28] McBride J., Fakhouri O., C. -P. Ma, 2009, MNRAS, 398, 1858
- [29] Metcalf R. B., Madau P., 2001, ApJ, 563, 9
- [30] Moore B., Katz N., Lake G., Dressler A., Oemler Jr A., 1996, Nature, 379, 613

- [31] Moore B., Lade G., Quinn T., Stadel J., 1999b, MNRAS, 304, 465
- [32] Naab T., Burkert A., Hernquist L., 1999, ApJ, 523, 133
- [33] Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1995, MNRAS, 275, 720
- [34] Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1996, ApJ, 462, 563
- [35] Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1997, ApJ, 490, 493
- [36] Neto A. F., 2007, MNRAS, 381, 1450
- [37] Press W. H., Schechter P., 1974, ApJ, 187, 425
- [38] Springel V., White S. D. M., Tormen G., Kauffmann G., 2001, MNRAS, 328, 726
- [39] Springel V., 2005, MNRAS, 364, 1105
- [40] Springel V., Di Matteo T., Hernquist L., 2005a, MNRAS, 361, 776
- [41] Taffoni G., Mayer L., Colpi M., Governato F., 2003, MNRAS, 341, 434
- [42] Taylor J. E., Babul A., 2001, ApJ, 559, 716
- [43] Taylor J. E., Babul A., 2004, MNRAS, 348, 811
- [44] Tormen G., Diaferio A., Syer D., 1998, MNRAS, 299, 728
- [45] van den Bosch, 1999, ApJ, 515, 50
- [46] Ghigna S., Moore B., Governato F., Lake G., Quinn T., Stadel J., 1998, MNRAS, 300, 146
- [47] Khochfar S., Burkert A., 2006, A&A, 445, 403
- [48] Klypin A., Gottlöber S., Kravtsov A. V., Khokhlov A. M., 1998, ApJ, 516, 530
- [49] Velaázquez H., White S. D. M., 1999, MNRAS, 304, 254

- [50] Vitvitska M., Klypin A. A., Kravtsov A. V., Wechsler R. H., Primack J. R., Bullock J. S., 2002, ApJ, 581, 799
- [51] Zentner A. R., Berlind A. A., Bullock J. S., Kravtsov A. V., Wechsler R. H., 2005, ApJ, 624, 505
- [52] Zahang B., Wyse R. F., Stiavelli M., Silk J., 2002, MNRAS, 332, 647

Abstract

Evolutionary history of the satellite dark halos during a merger

Dowon Yi

Understanding the dynamical properties of dark matter halos during mergers is an important ingredient for models of galaxy formation. In this thesis, we study evolutionary histories of satellite dark matter haloes using N-body simulations. We show that halo mergers in the present-day universe have more circular orbits than those in earlier universe. We also find evidence for correlations between the orbits and environment effects based on Press-Schechter mass function.

Our merging simulations cover a wide parameter space in terms of mass ratio, energy, and eccentricity. We find that the mass loss of the satellites is primarily affected by the orbital parameters and the shape of the host halo potential. We compare N-body simulation results with an analytic Chandrasekhar theory of dynamical friction. Based on average rate of mass loss of the satellite haloes with randomly selected eccentricities, we find that the analytic approach with a free parameter $\alpha = 0.4$ for mass loss can reproduce the N-body simulation results.

Key words : galaxies:haloes–galaxies:cosmology–galaxies:formation.