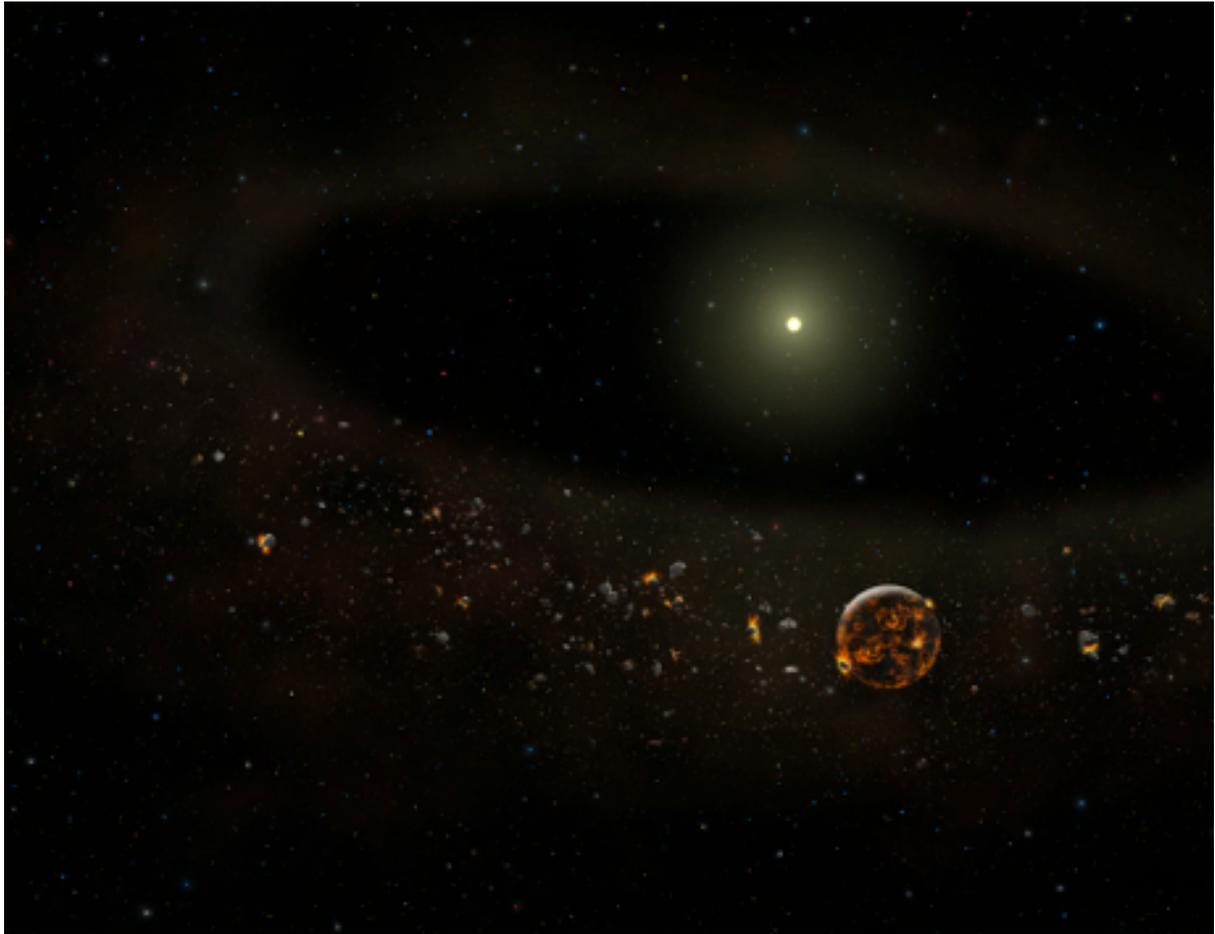


먼지 원반 (Debris Disks) 으로의 여행

Minjae Kim (김민재)

ITAP, Kiel Univ., Germany (이론물리 및 천체물리학 연구소, 킬 대학교, 독일)
LSW, Heidelberg Univ., Germany (주립 천문대, 하이델베르크 대학교, 독일)



천체 삽화가의 상상도: TYC 8241 2652 1 먼지 원반 Credit: Gemini Observatory/AURA Artwork by Lynette Cook

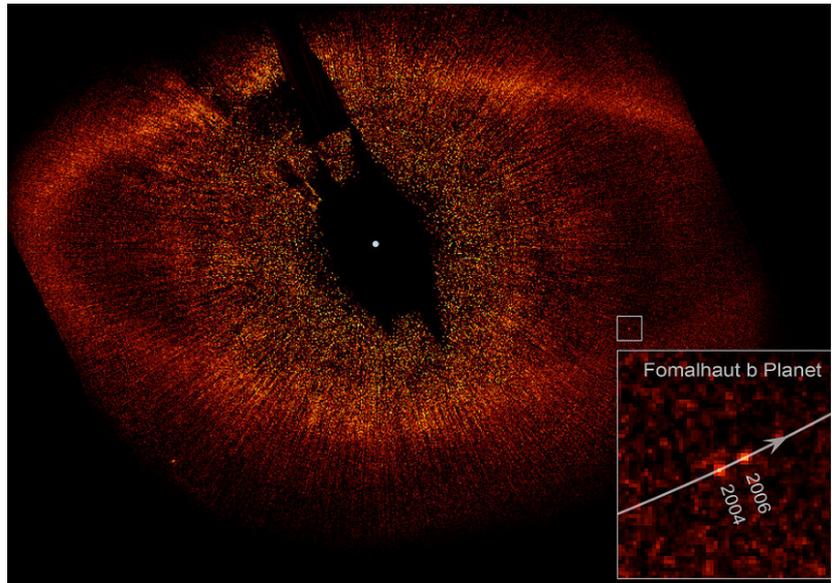
또 다른 지구를 찾아서

인간이 정착할 수 있는 지구와 비슷한 행성을 찾는 것, 이는 인류의 오랜 숙원 이자 앞으로도 끊임없이 바랄 인간의 마지막 꿈이 아닌가 합니다. 또 다른 지구를 찾기 위해서 우리는 별의 일생 일대를 추적해 볼 필요가 있습니다. 별이 쓸 수 있는 에너지는 별이 태어날때의 초기 질량에 따라서 운명이 이미 정해져 있기에, 아쉽게도 별의 모든 일생이 밝게 빛나는 것은 아닙니다. 정해진 에너지를 다 쓰게 되면 별은 초라한 뒷모습 만을 남긴 채 마지막 발악을 하게 되고 결국 어둠속으로 자취를 감추게 되겠죠. 하지만 이는 또 다른 별의 재탄생을 부추기는 방아쇠가 될 수 있습니다

“ 지금까지 확인된 먼지 원반만 해도 무려 1000개가 넘습니다 “

그림 1.
가장 유명한 먼지 원반인 Formalhaut

Kalas et al. 2008



다. 별의 일생은 인간의 인생과 많이 닮아있습니다. 인간은 꾸준히 운동을 하고 약을 복용하면서 어느정도 수명을 늘릴 수 있죠. 물론 별 역시 수명을 늘릴 수 있는 방법이 있습니다. 우주는 상상할 수 없을 만큼 넓기 때문에 변수는 매우 많습니다. 우리가 알고 있는 대부분의 별들은 태양처럼 홀로 존재 하지 않고 2개 이상의 별이 서로 공전하는 쌍성계에 포함되어 있습니다. 따라서 한 별의 수명이 다하면 다른 한별의 수명에도 영향을 미치게 됩니다. 정해진 궤도가 바뀌게 되면서 다른별에 흡수되어 (Swallowing) 더 큰 별이 될 수도 있고 또는 정해진 시간보다 훨씬 더 일찍 생을 마감할 수도 있습니다.

먼지 원반이란 ?

오늘 알아보려고 하는 천체는 별의 나이가 중장년이 되어야만 볼 수 있는 천체 입니다. 태양계를 구성하고 있는 천체를 알아보면 중심 한 가운데에 (쌍성이 아니라 가정했을시) 위치해 있는 별 (Star), 그 별을 도는 행성 (Planet) 들, 그 행성을 도는 위성 (Satellite), 왜행성 (Dwarf planet¹) 그리고 다양한 크기의 미행성² 및 각종 먼지 등이 있습니다. 지구에서 다른 태양계를 관측한다면 별과 가까운 부분은 밝게 빛나지만 별로부터 멀리 떨어진 부분은 빛보다 어둠에 훨씬 가깝습니다. 오늘의 주제가 태양계에서 별과 조금 멀리 떨어져서 별을 크게 감싸고 있는 부분인 먼지 원반은 바로 이 어둠속에 있습니다. 토성 (Saturn) 은 누구나 좋아하는 멋진 띠를 두르고 있습니다. 그 띠를 별에 적용시켜서 별이 아주 큰 띠를 두르고 있다고 생각하시면 됩니다. 쉽게 말해서 별과는 약간 먼 거리에 형성되어 있는 고리 모양의 별을 둘러싸고 있는 원반이죠. 별을 둘러싸고 있는 띠도 시간이 흘러감에 따라서 진화를 하게됩니다. 초기에는 원시 행성계 원반의 형태로, 후기에는 먼지 원반의 형태로 진화하게 됩니다. 이 먼지 원반은 대부분 시간이 적당히 지난 (~ 10만년) 주계열성 (Main Sequence star) 의 태양계에 나타나며 (이 때문에 많은 먼지 원반 관련 시뮬레이션 코드는 대문자 M을 포함하게 됩니다) 무수한

¹ 우리가 알고있는 대표적인 왜행성에는 명왕성 (Pluto) 이 있습니다. 다만 2006년에 행성지위를 박탈 당했기에 Planet Pluto라는 명칭 대신 134340 Pluto라는 명칭으로 불리웁니다. 앞의 숫자 134340은 왜행성번호를 나타냅니다.

² 미행성 (Planetesimal) 은 주로 Km사이즈의 천체로서, 새로 태어난 항성 주위를 둘러싼 원시행성계 원반 내에서 일어나는 강착 과정을 통해 만들어졌다고 믿고 있습니다. 원반에 포함된 얼음 조각이나 먼지가 서로 충돌하면서 처음에는 정전기력으로 합쳐지다 과정이 심화되며 중력에 의해 큰 것이 작은 것들을 끌어당기면서 성장하여 미행성이 됩니다. 미행성 중 상당수는 최종적으로 격렬한 충돌로 인해 산산조각이 나고 먼지들이 됩니다. 하지만 주로 커다란 미행성들은 대충돌들을 겪음에도 살아남아 (주로 응결, 결합: Agglomeration을 통한) 성장을 계속하여, 원시행성 또는 행성이 되었다고 여겨지고 있습니다. 먼지가 주로 micron (10^{-6} m) 규모임을 상기시켜보면 미행성들은 엄청나게 큰 천체입니다.

먼지와 파편 등으로 이루어집니다. 2010년 현재 1000개 이상의 먼지 원반이 주계열성 주위에 존재하는 것으로 확인되었습니다. 가장 유명하고 정확히 관측된 먼지 원반으로는 포말하우트³ (Fomalhaut, 그림1) 별의 원반이 있습니다. 아주 이례적인 예로 중성자별을 둘러싸고 있는 먼지 원반도 발견되었습니다. 이는 조금 더 연구가 필요할 듯 보입니다. 이유는 차차 설명하겠습니다.

먼지가 왜 중요한가?

먼지 원반의 거의 대부분은 먼지와 미행성으로 이루어져 있습니다. 그럼 먼지가 우주에서 왜 중요할까요? 우주공간은 아무것도 없어 보이지만 무수히 많은 먼지와 파편, 그리고 많은 종류의 가스들이 존재하고 있는데 이러한 물질들을 바로 성간물질라고 합니다. 이러한 모든 물질들이 모여 덩어리가 되어 있는 것을 우리는 성운이라고 합니다. 성간 물질 (Interstellar medium) 에서 먼지는 서로간의 열열학적, 화학적인 상호작용을 하게 됩니다. 특히 별의 형성과정에 아주 중요한 역할을 합니다.

우리가 만약 우주에 있는 모든먼지를 걷어낼 수 있다면 밤하늘의 별빛은 지금보다 훨씬 더 밝을 것입니다. 먼지는 짧은 파장의 빛 (가시광선) 을 약화시키고 (흡수 : Absorption) 다시 이를 조금 더 긴 적외선 파장으로 내뿜기 때문입니다 (재방출 : Re-emission). 따라서 적외선 망원경은 먼지 관측에 아주 중요한 도구가 됩니다. 요즘 가장 활발한 연구가 진행되고 있는 분야 중 하나인 빅뱅이론 연구에서도, 먼지는 우주 배경 복사 (Cosmic microwave background : CMB) 에 관여⁴를 합니다. 따라서 우주에 어떤 성분의 먼지가 있고, 그 먼지의 크기 그리고 분포도는 어떤가 알아내는 것은 천문학에서도 가장 중요한 분야중 하나라고 할 수 있습니다.

먼지 원반의 기원

그렇다면 오늘의 주제인 이 먼지 원반은 왜 중요한 걸까요? 먼지 원반이 중요한 이유를 살펴보려면, 이들의 형성과정을 알아야 합니다. 먼지원반의 형성과정은 그동안 천문학에서 끊임없이 주장되어온 평범한 행성들의 형성과정으로 충분히 설명 됩니다. 행성이 형성되려면, 먼저 별이 형성되어야 합니다. 별의 형성에 가장 중요한 힘은 중력입니다. 엄청난 밀도의 분자구름 일부분이 동그란 구의 형태로 붕괴 되면서 별로 변하기 시작합니다. 이를 중력 붕괴라고 부르는데, 이 중력 붕괴가 일어난 부분은 결국 태양으로 변할 것입니다. 엄청난 밀도 덕분에 이부분의 질량은 태양의 최고 1000배정도 무거워 질 수 있습니다. 각운동량 보존 법칙⁵ 에 따라 성운은 붕괴하면서 회전 속도가 빨라지게 되고 성운 내 물질이 뭉치며 물질 내부에 있는 원자는 더욱 자주 충돌하기 시작합니다. 내부의 충돌은 열 형태로 에너지를 방출하게 됩니다. 약 10만 년에 걸쳐 중력, 압력, 자기장, 원반의 회전 등으로 발생한 에너지 때문에 구 형태로 압축되어 있던 성운은 평평해지게 됩니다. 그 중앙부분에는 뜨겁고 밀도

³ 포말하우트 (Fomalhaut) : 물고기 자리에서 가장 밝게 빛나는 가을철 남쪽하늘에 낮게 떠 있는 별입니다. 주변에 이 포말하우트 별외에는 밝은 별이 없어서 항해에 많이 이용되는 별자리입니다. 포말하우트는 아랍어로 물고기의 입이라는 뜻인만큼 물고기자리의 입부분에 위치 해 있는 별입니다. 물병자리의 물을 물고기가 마시고 있는 형상이라서 이 이름이 지어졌다고 합니다.

⁴ 2014년, 미국과 유럽 연구진들이 중력파를 처음 발견한것 같다고 학계에 보고를 했지만, 이 중력파 추정 파장은 우주먼지의 산란 현상 때문인것으로 알려졌고 데이터 해석 오류를 인정하게 되었습니다. 결국 2014년 3월에 발표 논문을 철회했습니다.

⁵ 각운동량 보존법칙은 회전하는 물체의 운동량은 늘 보존된다는 법칙입니다. 그들의 반지름과 속도는 늘 보존되기 때문에, 반지름이 작아지면서 속도는 점점 빨라지게 됩니다.

높은 원시별이 생겨나게 되고 이 원시 별이 주계열성이 되기전까지 가장자리부분은 반지름 200 천문단위 (AU⁶) 정도의 초기 원반으로 진화하게 됩니다. 이 초기원반형태를 우리는 원시 행성계 원반 (Protoplanetary disk) 이라고 부릅니다. 원시 행성계 원반이 태양계를 둘러싸고 있을때, 아마도 행성 형성 과정이다 끝나지 않은 단계일겁니다. 이 원반의 중앙엔 중심부 원시별 주위를 도는 먼지 알갱이들과 가스가 서로 뭉치거나 상호작용을 하게 되는데 이를 우리는 강착 (accretion)⁷ 현상이라고 부릅니다. 이 이론에 따르면, 됩니다. 작은 먼지들이 서로 뭉쳐서 미행성 크기의 천체가 되고, 질량이 점점 커지면서 주변의 수소와 헬륨을 효과적으로 끌어당길 수 있습니다. 행성들과 수많은 먼지들은 결국 태양에서 바깥쪽으로 뿜어져 나오는 복사압력과 태양풍등의 영향으로 점점 바깥으로 밀려나게 되고 적당한 거리를 유지하며 태양계를 공전하게 됩니다. 이로써 행성들의 기본적인 성장⁸은 끝을 맺게 됩니다

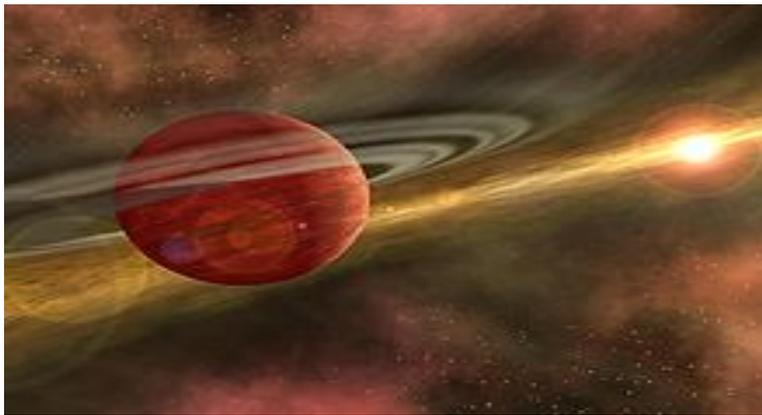


그림 2.

천체삼화가의 상상도, 태어난 지 얼마 되지 않은 가스 행성이 원반에 있는 주변 가스와 먼지를 빨아 들이며 커지고 있습니다.

물리학적으로 투명도를 측정할때 광학적 두께 (혹은 광학적 깊이) 라는 용어를 사용하는데 이는 경로 상에서 산란되거나 흡수된 빛의 일부분에 대하여 log형태로 정의합니다. 광학적 깊이는 쉽게 생각해서 우리 시선이 어디까지 뚫고 들어갈수 있느냐에 해당하는것이고 따라서 광학적 두께는 불투명도라고 생각하면 됩니다. 광학적 두께가 얇다는 건 불투명도가 작다는 뜻 (= 투명하다) 이므로 시선이 더 깊은 곳까지 뚫고 들어갈 수 있습니다. 반대로 광학적 두께가 두껍다는 것은 불투명도가 크다는 말이므로 시선이 깊은곳 까지 들어 가기 힘듭니다. 원시 행성계 원반은 자욱한 가스로 둘러 쌓여 있어서 빛이 자유롭게 뚫고 나가기 어렵습니다. 따라서 이를 물리학에서는 높은 광학적 두께라고 표현합니다. 밀도가 높은 가스들이 가득하기에 나아가려는 빛이 점점 흡수되고 자유롭게 움직일 수 없습니다. 반면 태양계 가운데 별이 주계열성⁹ 으로 진입하고 난 후 일정시간이 지나면 (보통 10만년의 시간이 지난후) 이 원시 행성계 원반은 전혀 다른 형태로 진화하게 됩니다. 대부분이 먼지로 이루어진 이 원반은 어마어마한 양의 가스를 품은 원시 행성계 원반과

⁶ 1 천문단위 (Astronomical unit; AU) 는 지구에서 태양까지의 거리입니다.

⁷ 강착 원반은 주변 물질들이 떨어지면서 만든 원반을 말합니다. 각운동량 보존법칙덕분에 강착현상이 일어납니다. 분자구름이 수축해서 고밀도의 중심부분 둘레의 가스가 낙하 하면서 점점 커집니다. 둘레의 가스는 맨 처음 천천히 회전하지만 낙하함에 따라서 회전속도가 점점 빨라 집니다. 이를 강착원반이라 부르며, 중심에 막 탄생된 활발한 별과의 상호작용을 하게 됩니다.

⁸ 태양과 가까운 지역은 온도가 높기 때문에 휘발성 분자들이 압축 되기가 힘듭니다. 그래서 녹는점이 높은 물질로만 이루어지는 지구형 행성이 형성 되게 됩니다. 이와 반대로 목성형 행성 (목성, 토성, 천왕성, 해왕성) 들은 동결선 바깥부분에 형성되게 됩니다. 이 동결선 부터는 태양광선이 약한 탓에 얼음화합물이 고체 형태로 살아남을 수 없습니다. 이곳엔 얼음 물질이 아주 많기 때문에 보통 목성형 행성들은 크기가 아주 커지게 됩니다.

⁹ 주계열 (Main Sequence) 은 대부분의 별의 일생에서 가장 긴 시간을 차지하는 진화 단계이며, 주계열성은 수소핵융합으로 헬륨을 만들어내며 이를 통해서 에너지를 만들어냅니다. 인간으로 치면 청장년기에 해당하겠죠.

는 다르게 가스함량이 매우 적습니다. 우리는 이 원반을 먼지 원반 (Debris disk) 라고 부릅니다. 먼지원반에는 가스가 거의 없고 먼지나 미행성들만 남은 관계로 낮은 광학적 두께를 가지게 됩니다. 먼지나 미행성들은 서로 끊임 없이 충돌하지만 빛이 전혀 방해 받지않고 자유자재로 통과할 수 있는 환경입니다. 이처럼 먼지 원반은 투명한 대기를 가지고 있기에, 복잡한 재산란현상은 무시가능 합니다. 따라서 빛의 플럭스(Flux) 를 예상할때도 훨씬 간단합니다. 먼지 원반 (Debris disk) 을 한마디로 표현하자면 “충돌하는 먼지나 파편으로 이루어진 텅빈 원반” 이라고 할 수 있을것 같습니다.

우리 태양계에도?

우리 태양계에도 먼지 원반으로 의심되는 2개의 천체가 있습니다. 바로 소행성띠 (Asteroid belts) 와 카이퍼벨트 (Kuiper Belts) 라고 불리는 천체입니다. 소행성띠 (소행성대) 는 화성 궤도와 목성 궤도 사이의 영역으로 미행성과 먼지들이 많이 있는 영역입니다. 소행성띠는 그림 3과 같이 도넛모양으로 생겼습니다. 최초로 발견된 세레스 왜행성¹⁰ 을 비롯하여 수백만 개의 소행성이 이곳에 있을 것으로 짐작되지만 우주선이 지나가도 부딪칠 염려가 없을 정도로 거의 비어있다고 봐도 무방 합니다. 카이퍼대 (에지워스 카이퍼띠 : Kuiper Belts, Edgeworth-Kuiper Belts) 는 해왕성 궤도보다 바깥쪽의 황도면¹¹ 부근에 있습니다. 카이퍼대의 바깥쪽 경계는 아직 불분명 하지만, 연속적으로 오르트 구름¹² 에 이어져 있다고 생각됩니다. 얼음과 운석들의 집합체로 거대한 띠 모양을 이루면서 태양의 주위를 돌고 있습니다. 각각의 형성과정에 대해서는 의견이 분분하지만 소행성띠는 목성의 섭동현상 (Perturbation) 에 의해서 행성이 되지 못한 먼지들과 미행성들이 모여서 띠를 이루고 있다고 생각되어 집니다. 카이퍼벨트 역시 행성이 되지 못한 먼지들과 미행성들의 집합으로 이루어 졌는데, 다만 이 벨트의 미행성들은 바깥태양계의 밀도가 매우 낮아서 행성 형성에 실패한것으로 보고 있습니다.

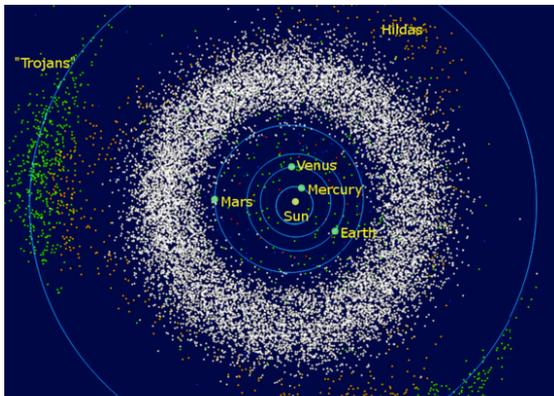


그림3. 소행성띠(흰색) 와 목성의 소행성들(녹색)

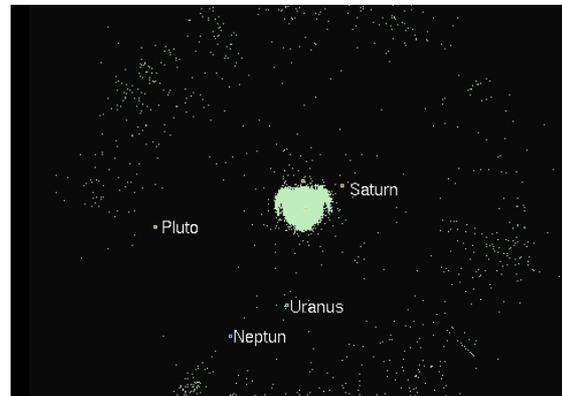


그림4. 카이퍼벨트의 개념도

그렇다면 우리는 오늘날 왜 먼지 원반에 대해서 관심을 가질까요? 온도가 높은 별들은 바깥쪽으로 뿜어져 나오는 복사압력과 태양풍등의 영향으로 먼지 원반을 날려 버리기에, 먼지 원반이 버틸 수가 없는 환경입니다.

¹⁰ 세레스(Ceres, 공식명칭 : 1 Ceres)는 소행성대에 있는 왜행성으로 현재 태양계의 소행성대에 존재하는 유일한 왜행성입니다. 세레스라는 이름은 로마신화에서 농업의 여신인 케레스에서 따왔다고 합니다.

¹¹ 황도는 하늘에서 해가 한 해 동안 지나는 길을 말합니다. 태양 주위를 공전하는 지구의 궤도면과 천구가 만나는 커다란 원의 면을 황도면이라고 합니다.

¹² 오르트 구름(Oort cloud)은 태양으로부터 약 1광년거리 떨어진 곳에 놓여있다고 추측되는 구상모형 혜성의 구름입니다.

니다. 따라서 먼지원반은 항상 적당한 온도의 주계열성주위에만 존재합니다. 먼지 원반을 구성하고 있는 먼지들은 Km사이즈의 미행성 (Planetesimals) 이라고 불리는 천체간의 지속적인 충돌로 인해서 만들어진다고 믿고 있습니다. 미행성 중 행성이 되지못하거나 상대적으로 빠른 시기에 (~ 10 만년) 빠져나와서 살아 남은 경우, 서로 상호간의 충돌이나 (아마도) 혜성타입의 천체반응을 통해서 끊임없이 먼지 원반을 구성하기 시작합니다. 따라서 먼지 원반은 행성 형성의 또 다른 잔재라고 볼 수 있습니다. 실제로 먼지 원반 안에 행성이 있다고 발견되는 경우도 있으며 많은 시뮬레이션 관측에서 이 행성들은 먼지 원반의 형태를 변화시키기도 합니다. 결과적으로 먼지 원반은 여러사이즈의 먼지부터 미행성 또는 행성을 포함 할 수 있기에 그 중 현재 진행중인 행성 형성 과정이 포함 되어있을 수도 있고, 여러 과정의 여러 형태의 천체가 먼지 원반안에 포함되어 있을 가능성이 큼니다.

행성들의 형성이 모두 끝난 우리 태양계에도 활발히 진화하고 있는 먼지 원반이 있는 것처럼, 다른 오래된 태양계일지라도 먼지 원반은 활발히 활동 중 일 가능성이 큼니다. 먼지 원반이 있다는건 오랜 시간이 지난 만큼 태양계 안의 몇몇 행성은 안정적으로 존재하고 있을 확률이 높습니다. 종합해보면 먼지 원반은 우리 태양계와 비슷한 온도의 태양을 찾고 또 지구와 비슷한 행성을 찾는데에 더없이 소중한 증거가 될 수 있겠죠. 또한 행성 형성 과정에 여러가지 제한조건을 (Constraint) 제시해 줄 수 있으며, 관측을 어떻게 효과적으로 할 수 있을지에 관한 많은 정보들을 얻을 수 있습니다. 먼지 원반을 찾고, 이 먼지 원반의 특징에 따라서, 행성이 어느 위치에 있는지 가늠할 수 있으며, 이 행성이 생명체가 살 수 있는 조건을 지닌 행성인지 아닌지 알 수 있습니다. 인류의 오랜 숙원이 이 먼지 원반의 존재에 따라서 해결 될 수도 있기에 먼지에 관한 연구는 천문학에서 점점 중요해지고 있습니다.

먼지 원반의 증거들

먼지 원반에 관한 증거는 아주 많습니다. 그 중 가장 대표적인 증거는 분광에너지 분포도 (Spectral Energy Distribution; SED) 를 통해서 찾을 수 있습니다. 분광에너지 분포도 (SED) 란 별이나 천체가 내뿜는 에너지의 세기를 파장별로 나타낸 도표입니다. 한 세기 전 독일의 두 천체물리학자 막스 플랑크 (Max Planck) 와 빈 (Wien) 은 빛의 파장과 온도가 반비례한다는 위대한 법칙을 발견해 내었습니다. 빈이 실험 결과를 바탕으로 발표한 이 빈 변위 법칙 (Wien's displacement law) 은 다양한 (절대) 온도에 대한 파장 함수로서의 흑체¹³ 열 방출 강도를 표현하고 있습니다. 이는 흑체에서 빠져나온 파장 가운데 에너지 밀도가 가장 큰 파장과 흑체의 온도가 반비례한다는 것을 말합니다. 쉽게 말해서 차가운 온도의 태양은 긴파장을 (주로) 내뿜고 뜨거운 태양은 짧은 파장을 (주로) 내뿜습니다. 따라서 차가운 별일수록 빨간색에 가까운 파장을 내뿜고 이를 천문학적으로는 “빨간별”이라고 표현합니다. 반대로 뜨거운 별은 파란색에 가까운 파장을 내뿜고 이를 “파란별”이라고 표현을 합니다. 빨간 불꽃보다 파란 불꽃이 온도가 더 높은 걸 보면, 빨간 별보다 파란 별이 온도가 더 높다는 건 이론적으로 당연한 말입니다. 다시 말해서, 주계열성이 내뿜는 빛은 뜨겁기 때문에 낮은 파장의 빛 (가시광선)을 내뿜게 됩니다. 따라서 별로부터 직접 빛을 받는다면, 분광에너지 분포도에서 가시광선부분이 높게 표현되죠. 그런데 먼지는 태양이 내뿜는 빛을 흡수한 후 재 반사 하곤 합니다. 먼지가 빛을 흡수 한후 다시 내뿜을때 원래 온도보다는 낮은 온도의 빛을 방출 하게 되는데 이는 가시광선보다 긴 파장의 빛을 방출 한다는 말과 같습니다. 분광에너지 분포도에서 가시광선보다 긴 파장은 적외선입니다. 따라서 먼지가 존재한다면 적외선 (긴 파장) 파장의 활성화를 기대할 수 있습니다.

¹³ 흑체 (Black Body, 독일어로는 Schwarzer Körper) 란 진동수와 입사각에 관계없이 입사하는 모든 전자기 복사를 흡수하는 이상적인 물체를 말합니다. 열평형 상태에 있는 흑체는 "흑체복사"라는 플랑크 법칙에 따라 전자기 복사를 방출합니다. 물체의 모양이나 구성요소와는 관계없이 아닌 오로지 온도에 의해서만 결정되는 스펙트럼을 가지고 있다는 것을 의미합니다.

정확히 이런 증거들이 많이 발견되었습니다. 이를 천문학에서는 적외선 과잉현상 (Infrared excesses) 이라고 표현 합니다. 가장 유명한 별중 하나인 베가 (Vega) 별에서도 이러한 증거가 발견되었습니다. 우리는 베가 (Vega) 별을 통해서 항성이 발산하는 빛 외에 적외선 영역을 통해 항성 주위에서 추가로 방출되는 총 2가지의 복사 에너지를 발견했습니다. 별이 홀로 존재할것이라고 믿었기에, 별이 내뿜는 적외선은 한군데 뿐일 것이라고 예상했던 천문학자들은 처음에 매우 혼란스러웠습니다. 이는 항성주위에 아무것도 없을거라던 종전의 예상을 깨는 엄청난 발견이었습니다. 대략 영하 180도의 온도를 가진 (그림5 의 파란 부분 ~ 100 micrometer 파장 근처) 미지의 물체는 무엇이였을까요? 지극히 낮은 온도이기에 열을 가진 광선이라고 생각하긴 어려웠지만, 이는 평범한 우주공간 (영하 270도 근처) 보다 90도나 높은 온도이기에 (지구보다) 이처럼 차가운 천체도 적외선을 방출 할 순 있습니다. 처음엔 소행성이라고 예상을 했지만 이는 불가능 한 설명이었습니다. 해당물체가 그만큼 온도가 되려면 태양으로 부터 거리가 어느정도 멀어야 했고 약 80AU정도 떨어진 곳에서의 온도라고 계산되었습니다. 이 의문스러운 존재의 궁금증은 적외선 천문관측이 계속된 후에야 풀렸습니다. 다른 특정지역이 아닌 베가별을 둘러싼 원반 형태의 지역에서 방출 되고 있었던 것이었습니다. 많은 양의 먼지는 소행성이나 행성처럼 상대적으로 규모가 훨씬 큰 천체들보다 훨씬 더 많은 빛을 (Photon) 방출 할 수 있습니다. 많은 양의 먼지가 모이게 되면 훨씬 더 큰 표면적을 가질 수 있기 때문입니다. 많은 표면적은 더 많은 빛을 흡수 할수 있다는 말이고, 따라서 더 많은 빛을 방출 할 수 있습니다.

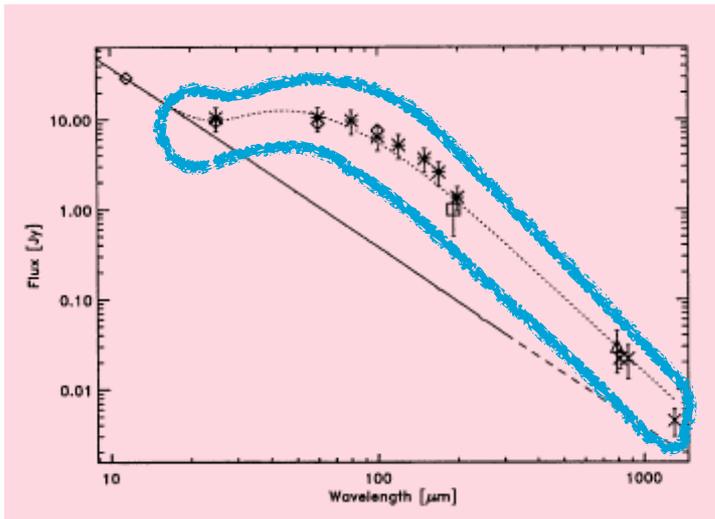


그림 5.
Vega별의 적외선 과잉현상
Heinrichsen, I. et al.

이 하나만으로도 엄청난 발견 이었지만 더 큰 성과가 있었습니다. 바로 이 적외선 방출로 인한 먼지크기의 예측이었습니다. 물체는 자신의 길이보다 더 긴 파장을 가진 광선을 방출 하지 못합니다. 따라서 먼지가 작을수록 파장이 짧기에, 이를 통해 작은 먼지가 큰 먼지보다 뜨겁다는 사실을 유추 할 수 있었습니다.

먼지 원반의 관측

먼지 원반은 크게 세가지 방법으로 관측할 수 있습니다. 첫번째는 실제 관측입니다. 빛의 산란을 이용한 짧은 파장으로의 관측, 즉 가시광선과 근적외선의 코로나 그래피를 이용한 관측이 있고 또 열적 태양광 방출을 이용한 긴 파장으로의 관측, 즉 중적외선과 밀리미터 파장을 이용하는 관측이 있습니다. 각각의 관측은 장단점이 있습니다. 짧은 파장으로의 관측은

더 좋은 해상도를 가질 수 있지만 더 많은 플럭스를 태양으로부터 받게됩니다. 짧은 파장으로의 관측은 작고 온도가 적당히 높은 먼지들을 관측할 수 있게 해줍니다. 따라서 짧은 파장으로의 관측은 같은 먼지 원반을 관측하더라도 긴 파장으로의 관측보다 먼지 원반이 더 크게 보입니다. 작은 크기의 먼지들은 먼지 원반 전체적으로 퍼져있기 때문입니다. 긴 파장으로의 관측은 큰 먼지들을 관측 할 수 있게 해줍니다. 긴 파장으로의 관측은 온도가 낮기 때문에 먼지 원반의 반지 (Parent ring) 라고 불리는 큰 먼지들이 주로 모여 있는 곳을 볼 수 있습니다. 짧은 파장에서는 빛의 산란을 이용하는 편이 좋으며, 긴 파장에서는 열태양방출이 훨씬 더 효과적입니다. 한가지 주의해야 할점은 망원경의 분해 능력보다 더 작은 각도로 분해된 점광원은 분해되지 않는다는 점입니다. 망원경의 해상도는 간단히 λ/D 로 나타 낼 수 있는데 (λ : 관측 파장 (Wavelength), D : 망원경의 직경 (Diameter of the telescope's objective)) 이 해상도는 라디안 (Radian)¹⁴의 단위로 표현되곤 합니다. 예를 들어서 녹색빛의 관측파장인 550nm¹⁵ 와 0.1 각초 (= 4.8×10^{-7} radians)의 해상도를 표현하고자 한다면, 우리는 $D = 1.14$ m의 직경 망원경이 필요합니다. 미행성과 먼지의 온도가 적외선 망원경에서 가장 잘 관측 되는점을 상기시켜 보면 적외선 망원경으로는 수 Km의 천체까지 밖에 관측 할 수 없습니다. 따라서 대부분의 미행성은 우리 인간이 가진 망원경으로는 관측할 수 없습니다. 또한 1각초¹⁶ (Arcsecond) 보다 작은 분해능을 가진 최첨단 망원경일지라도 천문학적시상 (Astronomical seeing) 과 다른 대기 효과들 때문에 관측이 매우 힘들어 집니다.

두번째는 이미 언급한대로 분광기 (Spectroscopy) 를 통한 관측입니다. 즉 분광기를 통해서 우리는 분광 에너지 분포도 (Spectral Energy Distribution; SED) 를 얻을 수 있는데 천문학에서는 이 역시 관측이라고 표현합니다. 분광에너지 분포도를 이용하는 이유는 간단합니다. 태양계에 별만 존재하며 먼지 원반이 없을 경우, 먼지 원반이 태양계를 가득 덮고 있는 경우 또 먼지 원반이 단지 벨트 형태를 이루고 있는 경우 총 3가지의 분광 에너지 분포도가 모두 다르기 때문입니다. 그림 6에서도 볼 수 있듯이, 맨위의 그림과 같이 별만 있다고 가정 했을시, 가시광선 부분이 밝게 빛나는 걸 볼 수있습니다. 가운데 그림 처럼, 태양계가 원반 전체로 둘러 쌓여있다고 가정할경우, 가운데 아주 높은 온도 부터 가장자리까지 끊임없는 다양한 온도를 가지게 됩니다. 다양한 온도 = 다양한 파장으로 대입을 시킨다면, 가시광선부터 적외선까지 끊임없는 파장이 밝게 빛나는걸 확인 할 수 있을겁니다. 마지막 그림과 같이 먼지가 원반형태로 존재한다면, 가운데 밝게 빛나는 태양의 높은 온도와 적당히 낮은 먼지의 온도 두가지로 생각할 수 있습니다. 따라서 두군데의 파장이 특징적으로 관측 될 수 있습니다. 지금까지의 모든 적외선 과잉현상은 (IR excesses) 마지막 그림과 같은 형태로 발견되었습니다. 따라서 원반의 형태로 먼지가 존재한다고 유추 할 수 있었습니다. 실제관측은 이 예측을 가능하게 만들었습니다.

세번째는 시뮬레이션을 통한 관측입니다. 컴퓨터에서 태양계와 비슷한 조건의 모든 환경을 시뮬레이션 코드 (Numerical codes) 로 작성한 후, 모든 초기 조건을 컴퓨터에 입력하여 시뮬레이션을 실행합니다. 시뮬레이션에서 볼 수 있는 이미지도 우리는 관측이라고 표현합니다. 이는 실제 관측과 비교해서 타당성을 얻을 수 있습니다. 시뮬레이션을 통한 관측은 제한조건을 걸어 두어 실제 망원경으로 볼 수 있는 비슷한 이미지를 볼 수 있으며 가시성 (Visibility) 을 계산하게 되면 실제 관측 가능성도 알 수 있습니다. 또 모든 파

¹⁴ 라디안 (radian) 은 반지름의 길이가 r 인 원 위에, 길이가 r 인 호를 가정할 때, 이 호에 대한 중심각의 크기를 말하며, 1라디안은 약 57도와 같습니다.

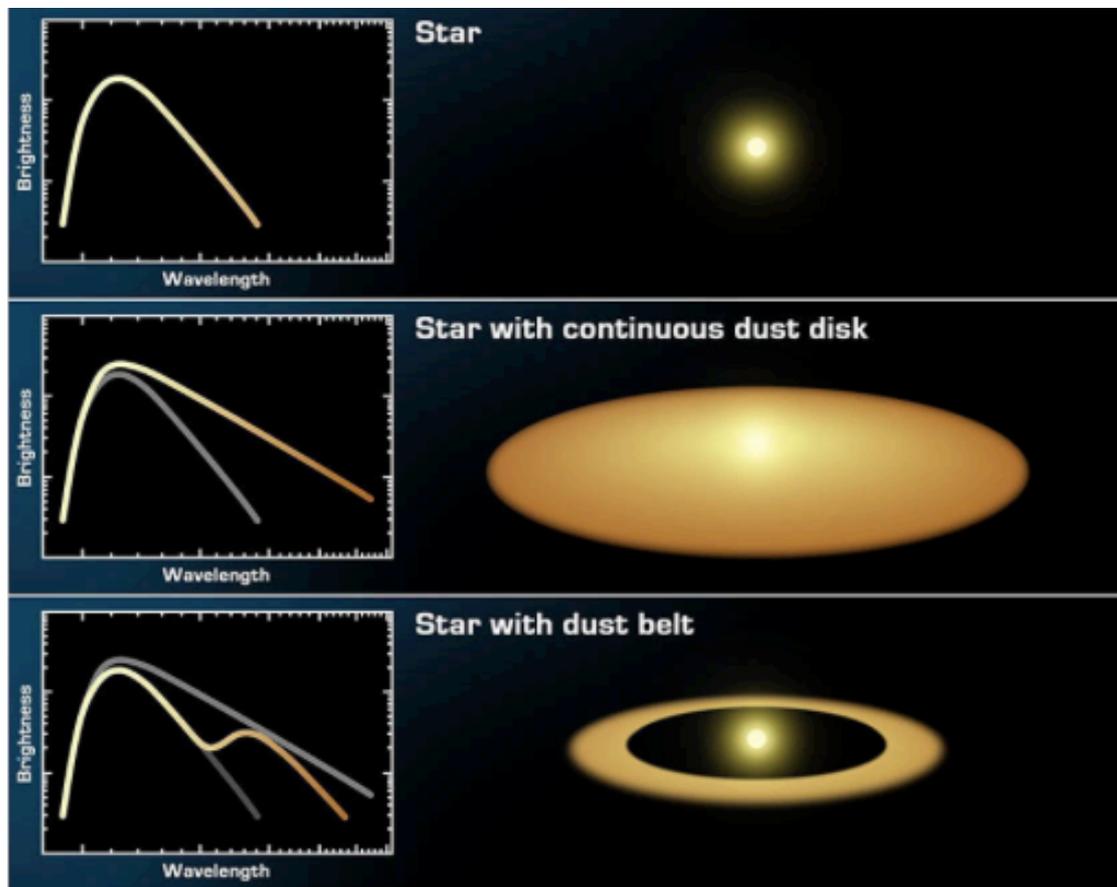
¹⁵ $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

¹⁶ 1 각초는 (Arcsecond) = 0,000277778 도 (degree) 와 같습니다. 각초란 각도의 단위로서, 1도의 60분의 1인, 1분 (minute)을 다시 60등분한 것 입니다. 즉, 1분을 60초로 정의합니다. 1도의 1/3600, 원둘레의 1/1296000에 해당합니다.

장별로 관측을 할 수 있기에 시간과 환경의 제약을 받지 않는 장점이 있습니다. 대부분의 천문학자들은 컴퓨터를 이용한 먼지 원반의 모델링 그리고 관측에 큰 시간을 쏟고 있기에, 시뮬레이션을 통한 관측은 앞으로도 끊임없이 이용될 것입니다.

그림 6.

출처 : <https://blog.diskdetective.org/category/debris-disks>



먼지 원반과 물리학

먼지 원반 안에서 다뤄야할 물리학들을 알아 보자면, 크게 나눠서 1. 별의 중력 (Gravitational Force), 그리고 이와 반대방향으로 상호작용하고 있는 힘인 2. 별의 복사압 (Radiation Pressure) , 3. 태양풍 (Stellar Wind) 4. 미행성과 먼지간의 상호작용 및 충돌 (Collisions) 5. 별이 뿜는 전자기력에 대한 항력¹⁷ (Drag Forces against Radiation Pressure) 과 태양풍에 대한 항력 (Drag Forces against Stellar Wind) 6. 먼지들의 승화작용 (Sublimation of dust) 7. 로렌츠 힘¹⁸ (Lorentz force) 8. 행성과의 상호작용 (Interaction with planets) 9. 기타 다른힘 등이 있습니다.

질량이 있는 물체는 중력의 영향을 받게 되듯이, 별 또한 중력의 영향에서 벗어 날 수 없습니다. 질량이 있는 별이 중력만 받게 된다면, 결국 별은 쪼그라 들것입니다. 하지만 별이 수축하지 않는 것은 중력에 역행하여 별 내부가 복사압에 의하여 지지되고 있기 때문입니다. 이러한 별의 중력과 복사압을 합쳐서 Photo-

¹⁷ 별이 뿜는 전자기력에 대한 항력을 포인팅-로버트슨 효과 (Poynting Robertson effect) 이라고도 합니다.

¹⁸ 로렌츠 힘 (Lorentz force) 은 전하를 띤 물체가 전자기장 안에서 받는 힘을 말합니다.

Gravitational Force (아직 용어가 한글로 번역이 되지 않아서 마땅한 용어를 찾기 힘들지만 별에 작용하는 가장 대표적인 두가지 힘인 복사압과 중력을 합친 표현입니다) 라고 표현합니다. 복사압은 천문학에서 가장 중요한 용어중 하나입니다. 복사압은 전자기파 또는 입자가 면에 미치는 정압력을 가리키는 용어입니다. 별이 빛 (photon) 을 내뿜을때 이 빛은 전자기파의 형태로 움직이게 됩니다. 따라서 전자기파가 별로 부터 나아갈 때는 항상 이 복사압을 내뿜게 됩니다. 즉 빛 (photon) 이 어떤 물체에 부딪혔을때 받게 되는 힘을 나타냅니다. 평면에 미치는 복사압은, 물체의 변형력과 마찬가지로 텐서¹⁹로 표시하고, 이 복사압이 있다는 것은 전자기파도 입자와 같이 운동량을 가지고 있다는 뜻이 됩니다. 복사압은 복사에너지를 빛의 속도로 나눈 값을 가지며 온도가 높은 별일수록 중력에 길항하는 커다란 부분을 차지하게 됩니다. 보통 크기가 큰 별들은 무겁고 온도가 높습니다. 무거운 별들에겐 큰 중력이 작용하고 따라서 큰 복사압이 내뿜어 집니다. 이 큰 복사압으로 인해서 먼지 원반의 먼지가 대부분 궤도 밖으로 날아가 버릴 수도 있습니다. 그래서 아주 큰 중력을 가진 중성자 별에서 먼지 원반이 형성 되는건 아주 드문 일입니다. 크기가 큰 미행성이 분해되거나 침식될 때 혹은 작은 입자들이 큰 물체로부터 분리되어 나올때, 이 Photo Gravitational Force (중력+복사압) 을 받습니다. 따라서 작은 입자들은 그들이 받는 중력에 대한 보상으로 복사압도 함께 받게되고 결국 멀리 날아가곤 합니다. 이 복사압이 너무 큰 경우엔 아예 궤도 밖으로 날아가 버리게 되 겠죠. 궤도 밖으로 날아가 버린 입자들이나 먼지등을 전문용어로 ‘Beta-meteoroid’라고 합니다. 반대로 상대적으로 큰 크기의 먼지나 입자들은 같은 복사압에도 날아가지 않으므로, 먼지 원반안에 존재할 수 있게 됩니다. 이러한 입자나 먼지들을 ‘Alpha-meteoroid’라고 합니다.

복사압은 중력과 반대 방향이므로, 바깥으로 퍼져 나가는 형태로 표현 할 수 있습니다. 태양계에는 바깥으로 퍼져 나가는 형태의 힘이 한가지 더 있습니다. 태양의 코로나, 플레어 같은 활동에 의해 순간적으로 엄청난 온도에 다다르게 되면 플라즈마²⁰가 대량 방출되는데 이를 우리는 태양풍 (Stellar Wind) 이라고 부릅니다. 태양풍을 이루는 플라즈마들은 이미 대전되어 있는 상태이며 중성이 아닙니다. 복사압과 태양풍은 두 힘을 이루는 입자의 전달 형태가 다른데, 입자의 전달 형태가 전자기파인 경우 복사압이라고 부르며 지 상에서 부는 바람과 같이 실제 힘 (Force) 을 가져 “평방미터당 몇g 중의 힘을 가졌다” 라고 표현합니다. 반면에 입자의 전달 형태가 플라즈마에 의한 태양풍은 실제 이러한 힘을 가지지 않습니다. 혜성의 꼬리가 태양계로 진입했을시에 태양의 반대 방향으로 향하는 것은 태양빛의 복사압과 태양풍에 의한 것입니다. 혜 성이 태양에 가깝게 다가가면서 혜성 표면의 얼음이 승화되어 이온의 상태를 이루는데, 이 이온 상태의 물 질들은 태양풍 (플라즈마) 의 영향으로 태양 바깥쪽을 향하게 되는것입니다. 이온 상태의 물질이 아닌 먼지 들은 중성이기 때문에 태양풍의 영향을 받지 않고 복사압의 영향을 받아 역시 태양 바깥쪽을 향하게 됩니 다.

먼지 원반에서 가장 중요한 한가지 물리학을 고르자면, 충돌을 고를 수 있습니다. 매우 잦은 충돌이 항상 일어나기 때문이죠. 작은 먼지가 무수히 많은 먼지 원반안에서, 이 작은 먼지들이 어디서 오는가 가장 큰 궁금증이었습니다. 짧은 수명에도 불구하고 (주로 복사압과 태양풍에 의해서 날아가 버리는경우) 끊임 없 이 추가되는 작은 먼지 들은 도대체 어디서 오는 것 일까요? 정답은 큰 먼지들끼리의 끊임없는 충돌로 인 해서 작은 먼지가 형성된다는 지극히 논리적인 설명으로 대체할 수 있습니다. 광학적인 한계 때문에 아주 큰 먼지들이나 미행성들을 우리가 볼 수 없지만, 이 잦은 충돌의 증거는 아주 많습니다.

¹⁹ 텐서 (tensor) 는 기하학적인 양을 표현하기 위하여, 벡터의 개념을 확장해서 사용하는 물리량입니다. 텐서는 좌표의 변환에 대 하여 불변인 형태를 갖고 있습니다.

²⁰ 플라즈마는 고체, 액체, 기체 다음의 네번째 물질의 형태로서 물질이 이온화 되어있는 상태를 말합니다.

태양계 초기의 원시 행성계 원반은 가스로 가득 차 있기 때문에, 충돌이 일어나기에 좋은 조건이 아닙니다. 원시 행성계 원반의 입자들이 충돌하는 속도는 가스들에 의해 꾸준히 감쇠가 되어 결국엔 충돌이 없는 상황으로 고려해도 될 만큼 평온한 상태가 됩니다. 그러한 이유로 원시 행성계 원반들은 보통 궤도가 기울어지거나 찌그러진 경우는 거의 없고 대체적으로 원형에 가깝습니다. 원시 행성계 원반에서 먼지 원반으로 진화할 때, 가스가 모두 없어지기 전에 고체들은 적당한 충돌 속도를 유지하기 시작합니다. 이때부터 먼지 원반에서의 충돌이 시작됩니다. 이를 태양계에서는 “휘젓는다”라고 표현 합니다. 갑자기 행성이 먼지 원반 안으로 들어오거나 혹은 드문 확률로 Flybys때²¹도 먼지 원반안에서의 충돌이 시작될 수 있습니다. 이러한 여러가지 상황으로 인해서, 충분히 먼지 원반이 “휘저어” 지게 된다면, 충돌이 점진적으로 일어나게 됩니다. 점점 잦은 충돌로 인해서 점점 입자가 작아지게된다면, 또다시 복사압의 영향으로 저 멀리 궤도 밖으로 날아가는 상황이 오게 됩니다. 이러한 끊임없는 과정이 계속됩니다. 이 작은 사이즈의 먼지들에게는 더이상 “휘저음”이 필요 없겠죠. 태양에서 나오는 충분한 복사압이 있으니까요. 크고 작은 먼지, 미행성들이 서로 충돌을 한 후 다양한 상호 작용을 하게 되는데, 어떤 먼지들은 서로 합쳐질 수도 있고, 큰 먼지들은 더 작게 부서질 수도 있습니다. 또한 서로 합쳐진 후 새로운 입자를 생성할 수도 있습니다.

충돌은 적정부피안의 각 입자들의 개수밀도 (Number density)²² 와 충돌하는 두 (혹은 여러 입자의) 입자의 단면적 (Cross section) 에 비례합니다. 서로 같은 부피에 상대적으로 큰 입자들이 모여 있으면 작은수의 개수밀도를 (Number density) 갖게 되므로, 큰 단면적으로 인한 높은 충돌횟수가 작은 개수밀도때문에 상쇄될 수 있겠지요. 또한 이 충돌은 충돌하는 입자들의 상대속도에 비례하게 됩니다. 먼지 원반의 궤도가 완벽한 원이 아니고 타원형이거나 원반이 태양에 평행하지않고 기울어져 있는 경우 상대속도는 더 높아지는 경향을 보입니다. 보통 광학적으로 투명한 이 먼지 원반에서는 상대속도가 1Km/s정도 됩니다. 이 상대속도는 태양과 가까울수록 훨씬 빠르며 100AU정도의 거리에서는 10배정도 낮아지는 경향을 보입니다.

충돌을 물리학적으로 표현 하면, 충돌을 위한 임계 에너지 (Q_D : Critical specific energy / Unit target mass) 와 함께 나타낼 수 있습니다. 임계에너지를 기술하는 방정식은 두개의 항을 포함하고 있는데, 작은 입자들에게는 입자들의 하중이 중요하고 큰입자들에게는 입자들의 중력이 중요합니다. 먼지입자들이나 미행성의 하중 (Strength of materials) 이 커지는 경우 충돌을 위한 최소 임계에너지 (Q_D) 는 높아지게 됩니다. 먼지 입자나 미행성들의 상대속도가 이 임계 에너지에 비례하는 임계 속도 : $\sqrt{8Q_D}$ 보다 높아진다면 물리학적으로 충돌이 일어나게 됩니다. 입자들의 하중이 높아졌다 가정한다면, Q_D 또한 높아지게 되므로, 최소 임계속도도 높아지게 됩니다. 따라서 높은 하중의 입자들이 모였다면 실제 충돌은 덜 일어나게 됩니다. 높아진 최소 임계속도보다 더 높은 입자들의 상대속도가 필요할테니까요.

충돌 (Collisions) 이 덜 일어나게되면 큰 입자들이 작은 입자들로 부서지는 경우가 적습니다. 이로 인해 별들의 반지라 볼리우는 중심부분 (Parent ring) 엔, 충돌이 잦은 경우에 비해 상대적으로 더 큰 입자들이 더 많이 상주하게 됩니다. 실제 충돌 물리학은 훨씬 더 복잡합니다. 통계학적으로 서로 다른 크기의 충돌이 비슷한 크기의 충돌보다 훨씬 더 많이 일어나게 되고, 빗겨맞는 충돌이나 부분적인 부서짐, 완전히 분쇄 되

²¹ Flybys는 탐사선이 궤도변경 또는 연료 절감을 위해 천체에 접근하는 것을 말합니다. 모든 천체 (행성이나 소행성, 위성) 들은 중력을 가지고 있고, 따라서 탐사선이 천체에 접근하면, 천체는 탐사선을 끌어당깁니다. 탐사선은 천체의 중력에 이끌리게 되므로 궤도가 휘어지게 됩니다. 동시에 중력을 받기 때문에 탐사선의 속력이 빨라지지요. 탐사선이 궤도를 바꾸거나 속력을 내려면 연료가 들어가는데, 그 비용은 어마어마합니다. 하지만 플라이바이를 하면 자연현상을 이용하므로 이러한 비용이 들지 않지요.

²² 개수밀도 (number density)는 자연과학분야에서 물리적 공간에 있는 어떤 물체의 집중 정도를 설명하기 위한 세기량입니다. 예를 들면, 같은 부피안에 3개의 별이 있는경우는 3의 개수밀도를 갖게 됩니다.

는 경우가 온전한 충돌보다 결과적으로 훨씬 더 잦기 때문에 여러가지를 한꺼번에 생각해야 합니다. 충돌은 먼지 원반에서 가장 중요한 변수 중 하나이기에, 많은 시뮬레이션 코드 (Numerical code) 들은 이 충돌을 정확히 계산하기 위해서 애쓰곤 합니다.

다음으로 항력을 살펴 보자면, 이는 유체 내를 통과하는 물체에 작용하는 마찰저항력을 말합니다. 어떤 힘이 있으면 그에 따른 마찰력은 당연히 존재 하지요. 따라서 태양이 내뿜는 힘에 대한 마찰 저항력이라고 볼 수 있습니다. 태양계에는 두가지 항력이 존재하는데, 첫째로 별이 내뿜는 복사압에 대한 항력 (Poynting-Robertson effect) 과 태양풍에 대한 항력 (Drag Forces against Stellar Wind) 이 있습니다. 특히 태양풍에 대한 항력은 먼지 원반에서 아주 중요합니다. 항력을 물리적으로 표현하면 유체내를 통과하는 물체의 속도에 반비례하게 표현이 됩니다. 빛의 속도 ($c = 2.98 \times 10^8$ m/s) 로 내뿜어지는 별의 복사압에 대한 항력은, 빛의 속도에 반비례하기에 아주 작습니다. 하지만 태양풍의 속도는 빛의 속도보다 훨씬 느립니다. 따라서 태양풍 속도에 반비례하는 태양풍의 항력은 복사압에 대한 항력보다 훨씬 더 커집니다.

이외에 다른 힘들 중 자기력을 예로 들면, 작은 입자들에게만 효과적으로 작용할 수 있기에 전체 먼지 원반에는 아주 작은 영향을 주게 됩니다. 따라서 복사압의 항력처럼 무시해도 무방합니다. 이외에 먼지가 얼음으로 이루어진 경우엔 먼지의 승화 (Sublimation)도 중요할 수 있겠죠.

또한 먼지 원반안에 행성이 있을 경우, 행성이 일으키는 먼지 원반과의 상호작용도 매우 중요합니다. 화가 자리²³ 에서 두번째로 밝은 별인 (그래서 beta 라는 이름이 붙었습니다) 베타 픽토리스 (Beta Pictoris) 역시 거대한 먼지 원반을 포함 하고 있습니다. 외계의 별을 둘러싸고 있는 무언가를 관측했던 첫번째 사례였던 베타 픽토리스의 먼지 원반에는 이상한 점이 있었습니다. 마치 균열이 있는것 처럼 무언가가 이 먼지 원반을 청소한것 같은 모습을 띠고 있었기 때문입니다. 또한 미 먼지 원반은 비대칭 구조였는데, 이는 행성이 먼지 원반 안에 있다는 (혹은 있었다는) 증거 중 하나 이기도 합니다. 따라서 행성의 존재 역시 먼지 원반에서 빼놓을 수 없는 중요한 물리학 중 하나입니다.

먼지 원반의 표준 모델

천문학자들은 먼지 원반을 좀 더 간략화하여 표현 할 수 있는 표준모델이라는것을 만들었는데, Photo Gravitational Force (중력+복사압) 와 충돌만을 고려하여 정의합니다. 충돌은 궤도의 이심률과도 큰 상관관계가 있기에 표준모델에서는 이심률의 변화를 통한 먼지 원반의 진화를 많이 다루곤 합니다. 별들의 반지 (Parent ring) 라고 불리는 곳에 존재하는 큰 먼지 입자들이나 미행성들은 충돌 연쇄 작용을 통해서 좀 더 작은 먼지로 작아지게 됩니다. 작은 먼지 사이즈가 되었을때, 태양복사압은 효과적으로 중심태양의 질량을 낮추고 빠르게 먼지들을 좀더 이심률²⁴이 높은 궤도에 데려다 놓게 됩니다. 그 결과 먼지는 이 미행성벨트 -별들의 반지 (Parent ring) - 바깥쪽으로 밀

²³ 화가자리 (Pictor) 또는 이젤자리는 남쪽 하늘(적위 -51°)의 별자리입니다. 밝은 카노푸스 (Canopus)와 대마젤란성운 (Large Magellanic clouds) 사이에서 찾아볼 수 있습니다. 비록 베타 픽토리스는 태어난지 2000만년밖에 되지 않은 상당히 어린별이지만, 2000만년은 행성 형성단계가 끝나기 충분한 시간입니다. 아쉽게도 이 화가자리는 대한민국에서 볼 수 없습니다.

²⁴ 기하학에서 이심률 (eccentricity) 은 원뿔 곡선의 특성을 나타내는 값입니다. 원뿔 곡선이 원에서 얼마나 벗어나냐를 나타내주는 값입니다. 천문학에서도 비슷한 개념을 사용합니다. 궤도 이심률 (orbital eccentricity) 은 어떤 천체가 다른 천체 주위를 공전할 때, 그 궤도가 얼마나 찌그러져 있는지를 나타내 줍니다. 얼마나 완벽한 원에서 벗어나 있는지를 나타내는 척도로서, 이심률이 0이면 완벽한 원형 궤도이고, 0과 1 사이 값을 가지면 타원형 궤도를 그리게 됩니다. 이심률이 1일 때는 포물선 궤도를 그리게 됩니다.

려나게 되죠. 더 작은 먼지들은 더 가볍기 때문에, 복사압의 영향을 더 크게 받아서 더 멀리 퍼지게 됩니다. 아주 작은 먼지들은 포물선 (Parabola) 궤도의 이심률을 벗어나 바깥으로 밀려나게 되듯이, 작은 먼지들이 받는 태양 복사압은 원반질량의 손실을 나타냅니다. 앞서서 말씀드린대로, 항력은 매우 중요합니다. 하지만 물리학에서 꼭 생각해야 할 것 중 하나가 시간척도 (Time scale)²⁵ 입니다. 크게 먼지 원반에서 중요한 세가지 시간척도라면, 복사압의 시간척도, 충돌의 시간척도 그리고 항력의 시간척도입니다. 복사압의 시간척도는 매우 짧습니다. 이는 복사압이 꾸준히 계속해서 태양계에 작용한다는 것을 뜻합니다. 그리고 보통 먼지 원반의 경우에, 항력 시간척도와 충돌 시간척도를 계산해보면, 항력 시간척도가 충돌 시간척도 보다 훨씬 길기 때문에, 충돌이 더 잦게 일어난다고 설명할 수 있습니다. 항력이 한번 작용할때, 더 짧은 시간 척도를 가진 충돌현상은 여러번 작용하게 됩니다. 지금까지 발견된 대부분의 먼지 원반은 이 충돌이 작용한 후 얼마 되지 않은것으로 보입니다. 이는 먼지 원반에서 항력이 작용하더라도 (먼지들이 태양쪽으로 다가 가게 되더라도) 금방 충돌이 다시 일어나기에 항상 충돌 후의 상황을 고려하는 것이 훨씬 더 논리적입니다. 이 간단한 표준모델을 컴퓨터에 적용시켜서 다양한 시뮬레이션 결과를 얻습니다. 많은 연구가 여전히 진행되고 있고, 표준모델을 이용한 시뮬레이션 결과는 실제 관측과도 상당히 비슷한 결과를 보여줍니다.

차세대 우주망원경 JWST

센타우르스자리의 프록시마 (Proxima Centauri)²⁶란 별을 아시나요? 프록시마 센타우리는 우리 태양계에서 가장 가까운 거리에 있는 별중 하나입니다. 특히 유럽남방천문대 (ESO)는 프록시마를 돌고 있는 행성 중에, 지구처럼 액체 상태의 물이 있는 행성이

있다고 예상하고 있습니다. 물이 있다면 당연히 생명체가 살 가능성도 높아지겠죠. 과학자들은 생명체가 살 수 있는 환경을 지닌 외계행성을 찾기 위해 끊임없이 노력해 왔습니다. 그래서 지금까지 무려 3000개가 넘는 외계행성을 발견했습니다. 대부분 수천 광년정도 먼 거리에 있기에, 관측이나 연구에 큰 어려움이 있었습니다. 그렇다고 프록시마 외계행성으로 당장 탐사를 떠날 수도 없죠. 현재 가장 빠른 우주탐사선으로도 수만년 정도의 시간이 필요하기 때문입니다. 따라서 과학자들은 대신 정확한 관측을 목표로 삼았습니다. 1990년 4월 25일 디스커버리 우주왕복선에 실려 대기권 밖 우주로 떠난 허블 우주 망원경 (Hubble space telescope; HST) 은 우주 관측 활동을 시작한 이래, 그 전까지 지구에서는 얻을 수 없었던 고분해능의 관측 자료들을 많이 보여주었으며, 실로 천문학 발전에 가장 많은 공헌을 한 현역 망원경입니다. 허나 이 허블 망원경은 2015년 관측 25주년을 맞이했고, 이는 점점 노후화된 허블망원경을 걱정해야 할 시기가 오고 있다는 걸 말해줍니다. 다행히 허블망원경의 뒤를 이을 또 하나의 걸작 망원경이 준비중입니다. 2018년 10월 이후²⁷ 프랑스령 기아나에 있는 기아나 우주 센터에서 아리안 5호 로켓에 실려 발사될 제임스 웹 우주 망원경 (James Webb Space Telescope; JWST) 이 그 주인공입니다. 노후화된 허블 우주 망원경의 뒤를 이을 계획 중에 있는 적외선 관측용 우주 망원경입니다. 이 망원경의 주 목적은 허블망원경 (혹은 지구의 지상 망원경이) 이 관측하지 못했던 아주 먼 우주의 천체들을 관측하는 것입니다. 적외선 망원경인 만큼 먼지 원반의 존재확인이나 세부관측에도 아주 유용할 것으로 보입니다. 따라서 먼지 원반을 연구하는 천문학자들의 목표는 자명합니다. 제임스 웹 우주 망원경 (James Webb Space Telescope;

²⁵ 어떤 힘이나 효과가 다시 작용 하기까지의 시간을 말합니다.

²⁶ 센타우르스자리 프록시마 (Proxima Centauri) 는 적색 왜성으로 센타우르스자리에 존재하는 별입니다. 태양으로부터 가장 가까운 곳에 있는 항성으로 약 4광년 정도의 거리에 위치해 있습니다. 적색 왜성이기에 매우 어둡고 맨눈으로는 볼 수 없습니다. 프록시마는 라틴어로 '가장 가까운'이라는 뜻입니다.

²⁷ 아쉽게도 계획은 계속 늦춰지고 있습니다.

JWST)의 관측을 용이하게 하기 위해서 많은 연구와 함께 정확한 예측을 하여, 어떤 방법이 먼저 원반의 관측에 효과적인지 알아내는 것입니다. 그럼 자연히 천문학자들은 우리 태양계의 탄생과 진화에 대해 우리 지구만큼 잘 이해할 수 있을 것입니다. 우리 태양계에 대해서 더 잘 이해하게 되고 더 많은 정보가 쌓이게 되면 자연스럽게 다른 태양계에 대한 이해도도 높아지고 이는 곧 다른 외계 행성들에 대한 높은 이해도를 의미합니다. 과학 기술은 이례없이 빠른 속도로 발전하고 있습니다. 이미 지구와 비슷한 여러 행성들이 학계에 보고된 사례도 적지 않습니다. 다양하고 정확한 더 많은 연구를 통해서 이들의 타당성이 증명된다면, 인류의 오랜 꿈인 외계행성 - 또 다른 지구 - 을 찾는 일은 시간문제라고 할 수 있을 겁니다. 그 날이 오고 있습니다.

Minjae Kim (김민재)

mkim@astrophysik.uni-kiel.de

Institute of Theoretical physics and Astrophysics,
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany

- **CARMENES** scientific member
- FOR 2285 Research Unit "**Debris Disks in Planetary Systems**" member

References :

- Pictures

표지 그림 : Gemini Observatory/AURA Artwork by Lynette Cook

그림 1 : *Kalas et al. 2008*

그림 2 : NASA Jet Propulsion Laboratory

그림 3 : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/InnerSolarSystem-en.png>

그림 4 : Maxim Razin : open source in Wiki

그림 5 : *Heinrichsen et al. 1998*

그림 6 : <https://blog.diskdetective.org/category/debris-disks>

- Papers

Krivov, A. 2010 : **Debris disk : seeing dust, thinking of planetesimals and planet**

Wyatt, M. 2008 : **Evolution of debris disk**

Matthews, B. et al. 2012 : **Observations, Modelling and Theory of Debris Disks**

- Websites

<https://www.jwst.nasa.gov/facts.html>