

## 1. 성간티끌

- 평균적으로  $10^6 m^3$ 에 1개 정도 존재하며, 질량은 성간물질의 1%정도를 차지한다.
- 워낙 크기가 작아 고체입자이긴 하지만 ‘연기’정도로 생각하면 된다.
- 가시광 영역의 빛을 아주 효율적으로 차단하므로 소광에 특히 중요하다.

### ○ 트럼플러

- 1930년 분광형으로부터 얻어진 절대등급과 구상성단의 겉보기 등급을 이용하여 구상성단의 거리를 계산한 뒤 성단의 각지름으로부터 실제 지름을 구하는 작업을 수행함.

$$D(\text{실제지름}) = d(\text{각지름}) \times r(\text{거리})$$

- 이 결과 구상성단이 멀리 있을수록 지름이 크다는 이상한 사실을 발견하고, 멀리 있는 성단일수록 거리가 과대평가 되었다는 가정 아래 성간 티끌의 존재를 알아냄.

### 1) 암흑성운과 성간소광

- 암흑성운 : 성간 티끌이 배후의 빛을 차단하여 어둡게 보이는 영역이다. 티끌이 집중되어 있는 부근에 나타난다.

### ○ 일반 차폐 현상 : 티끌이 넓은 영역에 고르고 희박하게 분포하는 경우 나타나는 소광

육안으로 그냥 식별되지 않으며, 별들의 실측개수와 예상개수를 비교해서 알 수 있음.

- 거리지수에 관선 식에 소광을 고려할 경우 아래와 같다.

$$m - M = 5 \log d - 5 + A \quad \Rightarrow \text{식(15-2)}$$

(A는 거리 d사이의 티끌에 의해 나타난 소광등급)

즉, 소광의 결과 겉보기 등급은 더욱 큰 값으로 나타날 것이며, 이는 별이 더 멀리 있다고 생각하게 만든다.

- 만일 티끌이 균일하게 분포하여 불투명도가 일정하다면 소광등급 A는 간단히 아래와 같다.

$$A = kd, \quad (k \text{는 상수로 관측결과 평균 } 2\text{mag/kpc로 쓰임, } d \text{는 거리})$$

실제 일반 성간소광은 고르지 않으며, 총 소광량은 해당 천체의 방향에 따라 크게 다를 수 있다.

### - 소광의 방식

- 흡수 : 흡수된 복사에너지가 열로 바뀐 후 적외선 파장으로 재방출하여 소광.
- 산란 : 빛의 진행방향이 바뀌어 원래 진행방향의 빛의 세기를 감소시켜 소광.

### ○ 성간소광의 정량적 이해

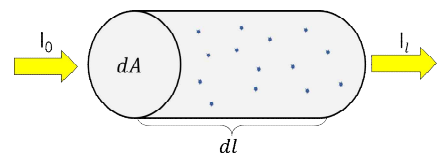
- 그림과 같이 원기둥을 생각하자. 원기둥 속의 티끌의 반지름이 평균  $a$ 라고 하고 티끌에 의한 소광효율계수를  $Q_{ext}$ 라고 하면 티끌에 의한 소광 단면적  $C_{ext}$ 는 아래와 같다.

$$C_{ext} = \pi a^2 Q_{ext}$$

- 이 원기둥에 의해 생기는 소광량을 구하기 위해 광학적 깊이를 고려하자.
- 티끌의 개수밀도(단면적에 대한)를  $n$ 이라고 할 때 광학적 깊이  $d\tau$ 는 아래와 같다.

$$d\tau = n\pi a^2 Q_{ext} dl = n C_{ext} dl$$

- 원기둥에 진입하는 입사광의 세기를  $I$ 라고 하면 감소한 에너지  $dI$ 는  $dI = -I d\tau$ 가 된다.
- $I$ 를  $I_0$ 에서  $I_L$ 까지,  $l$ 을  $0 \rightarrow l$  까지 적분하면



$$\int_{I_0}^{I_L} \frac{1}{I} dI = - \int_0^l d\tau = - \int_0^l n C_{ext} dl$$

이 되며, n을 상수 취급하면 간단히 아래와 같다.

$$\ln \frac{I_L}{I_0} = - n C_{ext} l = - \tau$$

- 위 식을 소광등급 A와 관련짓기 위해 등급을 이용하면 아래의 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} \Delta M_L = M_L - M_0 &= -2.5 \log \frac{I_L}{I_0} = -2.5 \log e^{-\tau} \\ &= (2.5 \log e) \tau = (2.5 \log e) n C_{ext} l \end{aligned}$$

- 위 식에서  $\Delta M_L$ 이 성간티끌에 의한 등급 변화, 즉 소광등급 A이므로 간단히

$$A = (2.5 \log e) \tau = 1.086 \tau \text{ 가 된다.}$$

$\tau = n C_{ext} l$  이므로 n(개수밀도)가 일정하다고 가정하면 소광등급 A를 거리에 관한 식,

$A = kd$ 의 형태로 바꿀 수 있으며, 실제 관측을 통해 n을 구할 수 있다. (d=1로 바꿈)

- 한편, 소광효율계수  $Q_{ext} = Q_{abs}(\text{흡수계수}) + Q_{sca}(\text{산란계수})$ 로 나타내어진다.

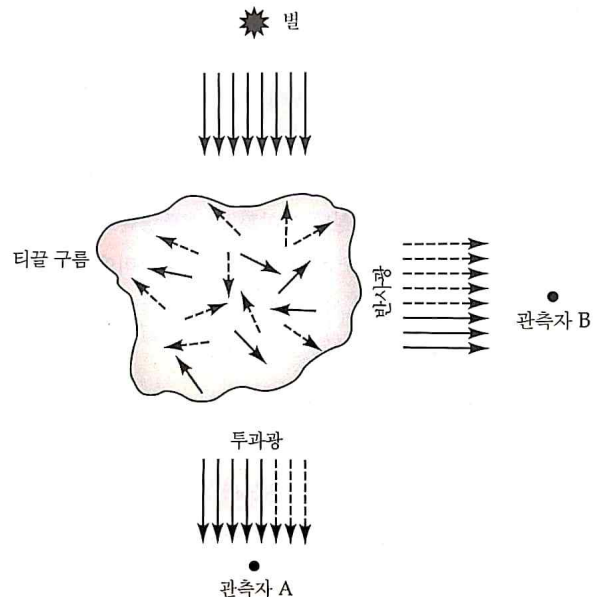
이 값은 입자의 크기와 파장의 함수로써  $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$ 의 관계를 가진다.

즉, 빛의 파장이 짧을수록 티끌의 반지름이 클수록 소광은 잘 일어난다.

## 2) 성간 적색화

### ① 성간 적색화의 의미와 선택산란

- 식(15-2)의 A로 표시한 소광량은 파장에 따라 달라진다.
- 단파장이 장파장보다 잘 소광되어 관측되는 별빛이 원래 색보다 붉게 보이는 현상이 '성간 적색화'이다.
- 별빛의 소광은 흡수보다 산란에 의한 효과가 더 크며, 성간 적색화도 티끌의 파장에 따른 선택산란의 결과이다.
- <그림 15-3>에서 보는 것과 같이 선택산란에 의한 효과는 관측자의 시선 방향에 따라 다르게 나타난다.
- 관측자 A는 단파장의 빛이 제거되어 적색화된 별을 보게 되고, 관측자 B는 단파장이 산란되어 반사성운이 관측된다.



<그림 15-3> 선택산란에 따른 적색화 현상

## ② 별빛의 색초과

- 성간 적색화에 의해 관측되는 별빛의 색지수는 본래 값보다 더 크게 관측된다.
- 적색화의 정도를 가늠하기 위해 색초과를 정의하여 사용한다.
- 색초과 $[E(B-V)]$ 는 색지수의 관측값 $(B-V)_{obs}$ 과 고유값 $(B-V)_{int}$ 의 차이로 아래와 같이 정의한다.

$$E(B-V) \equiv (B-V)_{obs} - (B-V)_{int} \quad \Leftrightarrow \text{식(15-3)}$$

- B와 V는 해당 파장에서 별의 겉보기등급 또는 절대등급을 의미한다.

☆ 앞에서 나오지만 엄밀하게 B와 V는 B필터와 V필터로 관측된 겉보기등급이지만, 천천서에서 절대등급을 의미한다는 것은 절대등급으로도 계산할 수 있다는 의미인 것 같다.

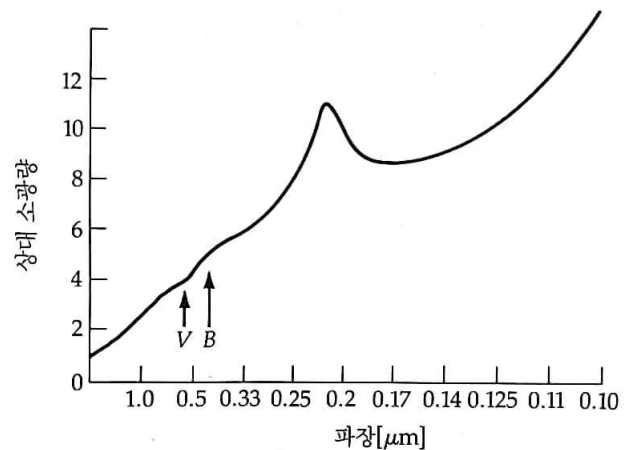
- 고유 색지수는 별의 분광형에 따라 결정되므로 스펙트럼을 찍어보면 알 수 있다.

## ③ 성간소광과 색초과의 관측값

- 가시광 영역에서는 성간소광량이 파장에 대략 반비례한다.(<그림 15-5> 참조)
- 은하의 대부분 영역에서 안시등급의 소광량  $A_V$ 가 색초과량  $E(B-V)$ 의 약 3배로 그 비율이 거의 일정하다.

$$A_V \approx 3 E(B-V) \quad \Leftrightarrow \text{식(15-4)}$$

- 관측한 별의 분광 특성이 특이하지 않다면 식(15-4)를 식(15-2)에 대입하여 별까지의 거리를 알 수 있다.



<그림 15-5> 일반 성간소광 곡선

### ○ 개념 적용.

겉보기등급  $m_V = 13.0$ 이며, 색지수가  $(B-V)_{obs} = 1.6$ 으로 관측된 G0V형 별이 있다. 이 별의 고유 색지수가  $(B-V)_{int} = 0.6$ 이며, 절대안시등급  $M_V = 5$ 일 경우 별까지의 거리를 구하시오.

- 색초과량은 (관측값-고유값)이므로  $E(B-V) = 1.6 - 0.6 = 1$ 이 되며, 식(15-4)를 이용하면 안시소광등급  $A_V$ 는 3.0임을 알 수 있다.
- 식(15-2)에서 알 수 있듯이 (관측된 겉보기 등급  $m_V$ -안시소광등급  $A_V$ )이 실제 겉보기 등급이 된다.
- 식에 대입하면  $13.0 - 5.0 = 5 \log d - 5 + 3$ 에서  $\log d = 2$ ,  $d = 100 \text{ pc}$ 이 된다.
- 만약 안시소광등급을 고려하지 않았다면 거리는 400pc으로 과대 추정되었을 것이며, 바꿔말해 거리 지수의 참값은  $m_V - M_V - A_V$ 이다.

## 3) 성간 편광

- 관측된 별빛은 가시광 영역에서 심한 경우 10%까지 편광되어 있다.
- 성간 편광 현상이 주로 성간 티끌에 의한 현상인 증거
  - 편광 정도가 소광 정도와 비례 관계에 있다.  $\Rightarrow$  즉, 색초과량이 큰 별에 크게 나타난다.
  - 성간 편광 현상이 은하면에 집중되어 나타난다.

### ① 편광도 FP

$$FP = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}, \quad \left( \begin{array}{l} I_{\parallel} : \text{편광축에 평행한 별빛의 세기} \\ I_{\perp} : \text{편광축에 수직인 별빛의 세기} \end{array} \right)$$

- 완전 무편광인 경우 :  $I_{\parallel} = I_{\perp}$ 이므로,  $FP = 0$
- 완전 선형 편광인 경우  $I_{\perp} = 0$ 이므로,  $FP = 1$

## ② 편광의 원인

- 그림에서 (가)와 (나)의 방향으로 진동하는 전자 기파가 진행하는 경우 성간 티끌에 의해 (가)는 (나)보다 더 잘 차단당한다.
- 만약 성간 티끌의 방향이 무작위가 아니라 정렬되어 있다면 전자기파도 특정 방향이 차단되어 전체적으로 편광이 일어난다.

## ③ 편광을 통해 알 수 있는 사실

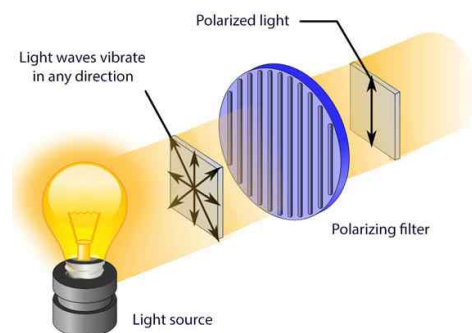
- 성간 티끌은 구형이 아니다.  $\Rightarrow$  만약 구형이라면 특정 진동만 많이 차단되지 않는다.
- 성간 티끌이 정렬되기 위해서는 성간 자기장이 있어야 한다.  
 $\Rightarrow$  즉, 편광 정도를 이용해 은하 자기장의 구조를 그릴 수 있다.

- 그림과 같이 성간 자기장  $\vec{B}$ 가 있을 경우 티끌은 단축을 중심으로 빠르게 회전한다.
- 이 경우 A 위치의 관측자는 원을 만드는 티끌을 보게 되고, B 위치의 관측자는 선형의 티끌을 보게 된다.
- 즉, 관측자의 위치에 따라 티끌에 의해 선형 편광되는 정도가 달라지며, 이 경우 관측자 B위치에서 편광의 정도가 훨씬 심할 것이다.
- 정리하면 시선방향과 자기장의 방향이 수직일 경우 가장 편광이 심하다.

## 4) 반사성운

- 위 그림에서 성간티끌이 모인 것이 결국 성간운이며, 별빛이 성간운에 의해 산란되어 다른 시선방향에서 관측될 때 반사성운의 모습으로 나타난다.
- 즉, 위 그림에서 시선방향 A의 연장선에 별이 있고, 관측자가 시선방향 B에 있으며 자기장 방향이 그림과 같다면, 관측자는 선형 편광된 반사성운을 관측하게 된다.
- 이러한 이유로 별빛이 무편광인데 반해 반사성운의 편광 정도는 20~30% 정도로 매우 높다.

☆ 천천서의 표현을 그대로 쓰긴 했지만, 내 생각에 반사성운의 편광 정도라는 의미는 관측되는 반사성운 중 편광된 반사성운의 비율을 의미하는 것 같다.



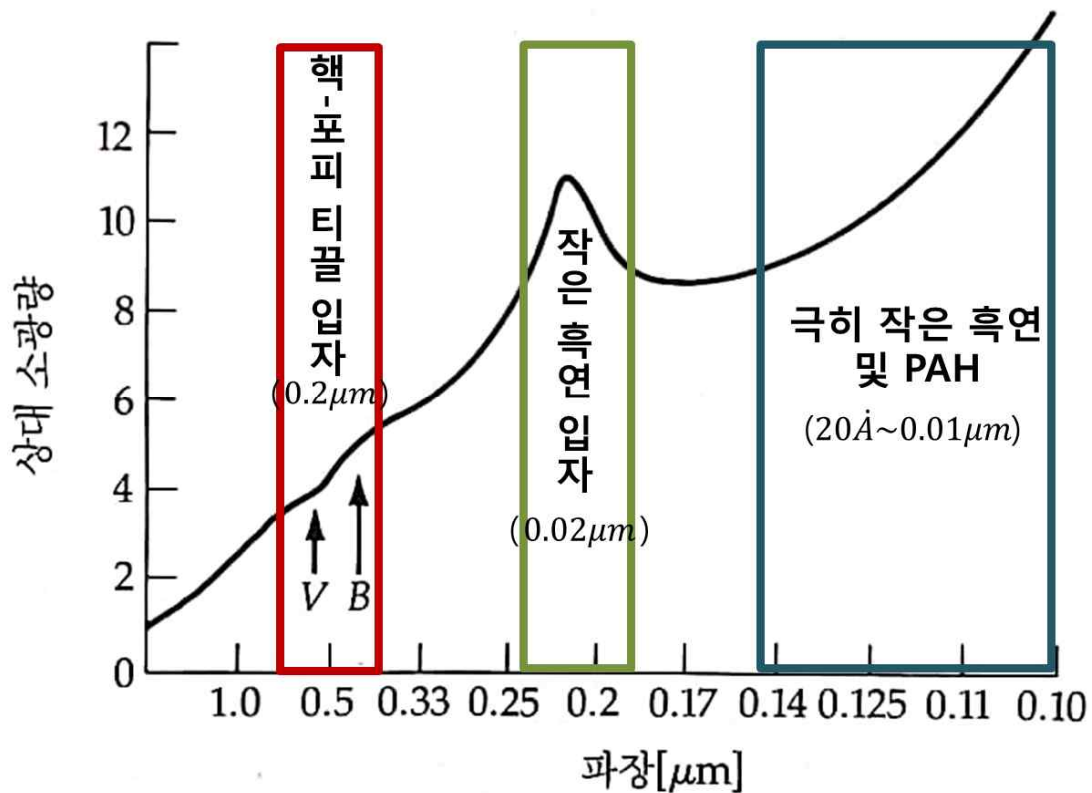
<그림> 3개의 편광필터로 관측한 예그 성운(좌), 편광필터의 원리(우)

##### 5) 성간티끌의 정체

- 성간 티끌과 관련된 현상 : 성간 적색화, 성간 소광, 성간 편광, 반사성운
- 성간 소광과 적색화의 특성으로 볼 때 성간 티끌은 고체 입자일 가능성이 높다.
- 성간 편광은 성간티끌의 모양이 비구형이며, 은하 자기장에 의해 정렬되어야 함을 의미한다.  
⇒ 얼음은 자기장과 반응하지 않으므로, 성간티끌은 순수한 얼음이 될 수 없다.

##### ○ 성간 티끌 모형

- 더러운 얼음 성분의 길쭉한 모양의 고체 입자
  - 흑연 알갱이(검댕 같은 탄소 입자) : 크기에 따라 다른 파장대에서 소광의 원인이 됨.  
⇒ 반지름 0.005~0.02 $\mu\text{m}$  크기(자외선 영역), 20~100 $\text{\AA}$  크기(빨간 짧은 파장대)
  - 내화성의 작은 핵 주위를 얼음층이 덮고 있는 핵<sup>1)</sup>-포피<sup>2)</sup> 구조의 고체 알갱이
  - 분자량이 매우 큰 다환 방향성 탄화수소(PAH)  
⇒ 탄소원자의 결합에너지가 높아 1000K 이상의 온도에서도 구조를 유지하며, 성간운의 적외선 영역 방출선(3~12 $\mu\text{m}$ )에 의해 밝혀짐.
  - 규산염 성분의 고체 입자
- 성간 티끌 모형에 해당하는 입자들은 단일 입자가 존재하는 것은 아니고, 각자 다른 파장대에서 소광에 관여함. 하지만 아직 정확히 밝혀진 것은 아니라고 함.



<그림 15-5> 일반 성간소광 곡선 + 원인으로 추정되는 성간물질의 종류

☆ PAH와 극히 작은 흑연은 파장대가 정확히 적혀있지 않아 대략적으로 그린 것임.

##### - 성간 티끌의 기원

- 휘발성의 얼음 종류 : 20~300K에서 응결, 저온·고밀의 성간 분자운 중심에서 만들어짐.
- 내화성의 암석 물질 : 700~2500K, 표면온도가 낮은 초거성 대기에서 응결 후 불려나감.

1) 반지름이 0.05 $\mu\text{m}$ 정도 되는 규산염, 흑연, 철 등이 후보이나, 그 중 규산염이 가장 적절한 후보 물질이다.  
2) 여러 종류의 얼음 성분

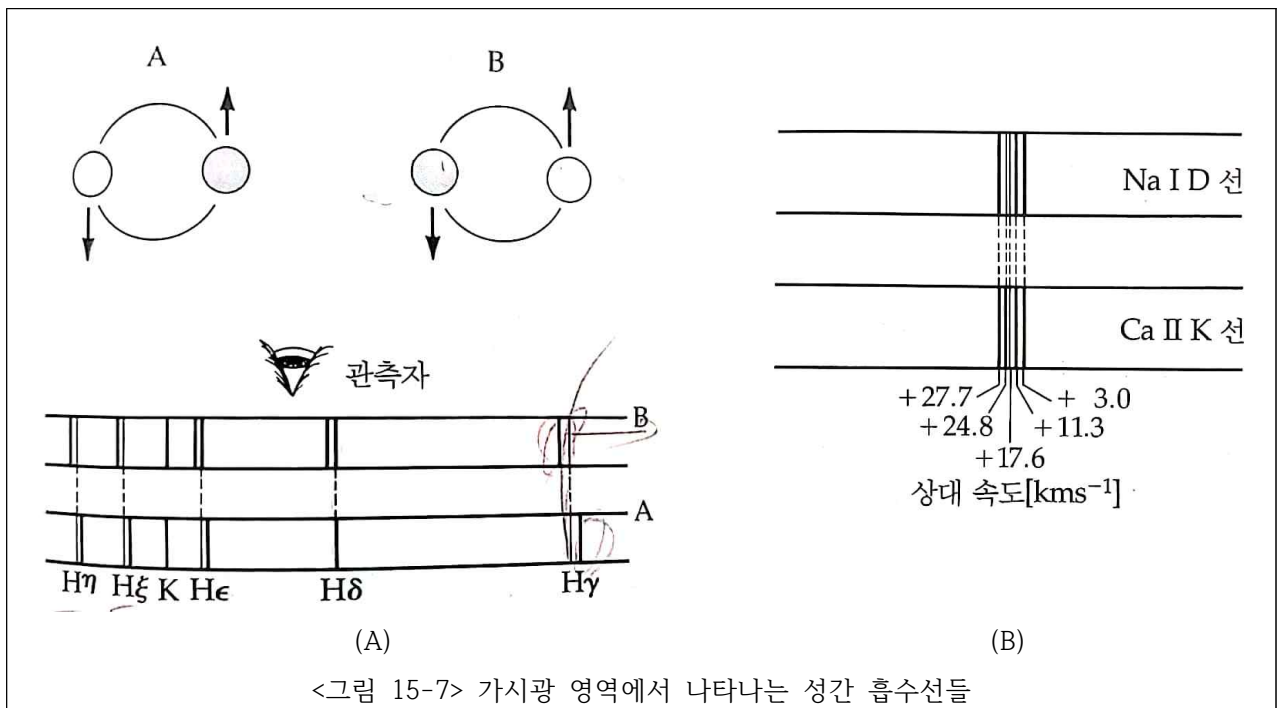
## 2. 성간 기체

- 종류마다 고유한 파장에서 흡수나 방출선을 만들지만 극히 제한된 고유 파장을 제외하고는 거의 전 파장 영역에 걸친 빛에 투명하다.
- 티끌 입자의 개수 밀도는 기체의 개수밀도 보다 훨씬 작다. 대략 [기체 : 티끌 =  $10^{12}$  : 1]

### 1) 가시광 영역에서의 성간 흡수선

#### ① 성간기체의 증거

- 자신의 분광형과 다른 특성의 흡수선이 나타나는 별의 존재,  
예) 여러 겹의 예리한 Ca II 선을 가진 B형별
- 쌍성계의 스펙트럼에서 궤도 운동에 의한 도플러 이동이 없는 흡수선의 발견  
⇒ 이를 통해 우주 공간에 존재하는 성간 기체의 존재를 알게 됨.



<그림 15-7> 가시광 영역에서 나타나는 성간 흡수선들

- <그림 15-7>의 (A)는 저운 성간운에 의한 스펙트럼과 쌍성계에 의한 흡수선이 중첩되어 있다. H $\gamma$ 선을 보면 A위치에서 적색편이, B위치에서 청색편이를 보이는 명확한 쌍성계의 성분과 함께 쌍성계의 운동과 무관한 약한 흡수선(성간기체에 의한)이 추가로 있음을 알 수 있다.
- 그림 (B)에서는 시선방향에 놓인 여러 개의 성간운에서 발생한 동일한 흡수선이 조금씩 다른 도플러 이동에 의해 여러 겹의 예리한 선들로 나타남을 알 수 있다.

#### ② 성간 물질에 의한 흡수선의 특징

- 선폭이 좁고 예리하다. ⇒ 온도가 낮아서 열적 도플러 현상이 적게 나타남.
- 선의 세기는 시선 방향에 놓인 해당 기체의 양에 의해 결정된다.
- 같은 종류의 흡수선을 만드는 성간 구름들의 상대적 위치와 속도에 따라 약간씩 다른 파장에서 겹쳐서 나타날 수 있다.

#### ③ 가시광 영역에서 흡수선을 만드는 물질 : Ca I, Ca II, Ti I, Ti II, Na I, CN, CH 등

☆ 관측결과 성간 기체의 중원소 함량이 태양이나 종족 I의 별들에 비해 훨씬 낮게 나타났는데, 이는 중원소들이 성간티끌에 결합되어 고유의 선을 나타내지 않기 때문인 것으로 생각된다. 한편 성간 기체 밀도는 매우 낮아 한 번 전리되면 다시 양성자와 전자가 만나기 힘들어 오랜 시간 전리된 상태를 유지한다.

## 2) 방출성운 : 전리수소 영역

### ① 수소 방출선

- 방출성운 : 고온의 중심별이 방출하는 강력한 복사의 영향으로 빛을 발하게 되는 기체 구름

- 전리수소 영역(HII 영역)

: O, B형 별에서 나오는 파장이 91.2nm 보다 짧은 광자에 의해 수소들이 전리된 상태로 존재하는 영역, 사실상 방출성운과 같은 의미이다.

☆ HII 영역에서 91.2nm 보다 짧은 파장의 광자가 흡수되며, 강한 성간흡수선인 라이먼 $\alpha$  흡수선이 만들어 진다.

#### ○ 스트룡그렌 구(Strömgren sphere)

- 중심별의 라이먼 연속 광자에 의해 중성수소가 모두 전리되는 구형의 영역

- 성간 수소 밀도가 균일하다고 가정할 경우 구형이 되겠지만, 실제로는 불균일하기 때문에 반드시 구형은 아니다.

#### ○ 광전리 평형(photoionization equilibrium)

- 단위 시간 동안 전자와 양성자가 재결합하여 중성수소로 되는 개수와 새로 전리되는 개수가 같아진 평형 상태

⇒ 전리된 수소는 지속적으로 재결합을 통해 중성으로 돌아가기 때문에 전리수소 영역이 일정 크기로 유지되는 것은 별에서 지속적으로 광자를 공급하기 때문에 가능하다.

- 균질 매질을 가정할 경우 반지름이  $R_s$ 인 구 내부의 평형조건은 아래와 같다.

$$N_{uv} = \frac{4\pi}{3} R_s^3 n_e n_H \alpha(2)$$

( $N_{uv}$  : 중심별이 전리시킬 수 있는 광자를 단위시간에 내놓는 수,  $n_e$  : 전자의 수,  $n_H$ :양성자 수)

-  $\alpha(2)$ 는 수소의 재결합 계수로서 단위는  $m^3s^{-1}$ , 바닥상태로의 재결합을 제외한 것이다.

☆ 바닥상태로의 재결합을 제외한 이유는 그때 방출된 광자가 다시 수소를 전리시키는데 사용되기 때문이다.

- 위 식을 통해 라이먼 광자에 의해 전리되는 영역인 스트룡그렌 구의 크기를 구할 수 있다.

스트룡그렌 구의 반지름  $R_s$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$R_s = \left[ \frac{3}{4\pi} \frac{N_{uv}}{n_e n_H \alpha(2)} \right]^{1/3} \Rightarrow \text{식(15-7)}$$

- HII 영역은 별에서 방출되는 높은 에너지의 자외선 복사를 낮은 에너지의 광자로 바꾸어 가시광인 발머 선의 빛을 내게 하는 일종의 **형광 작용**을 한다.

☆ 전리된 수소들이 재결합하는 과정에서 파장이 91.2nm보다 긴 광자는 쉽게 전리수소 영역을 빠져나 가지만, 이보다 짧은 파장의 경우 다시 전리시키는데 사용되기 때문에 결과적으로 짧은 파장은 제거되고 긴 파장만 남게 되어 나타나는 효과이다.

### ② 연속 전파 복사

- 전리수소영역(HII 영역)이 복사원인 전파 영역에서의 연속 복사이다.

- 전리수소영역에서는 해방된 전자가 전리영역 내부를 돌아다니며 아래와 같은 과정을 거칠 수 있다.

i. 전자가 이온을 만나 재결합하는 경우 ⇒ 자유-속박 천이(주로 가시광 영역 광자 방출)

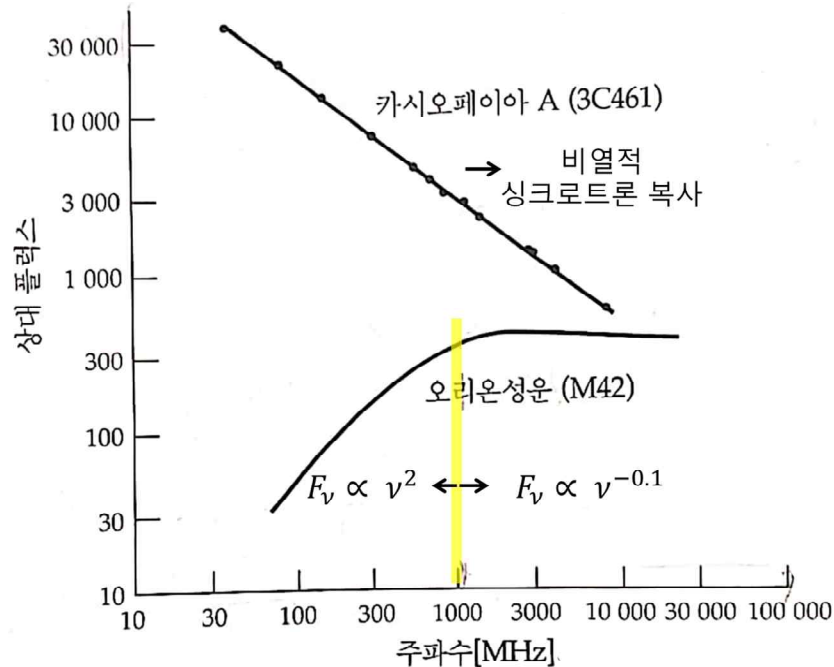
ii. 이온과 충돌하여 이온을 높은 에너지 준위로 들뜨게 하는 경우 ⇒ 이온의 금지선 방출

iii. 이온과 스쳐 지나가며 궤도가 수정되는 경우 ⇒ 자유-자유 천이(적외선 및 전파 방출)

- 전자의 궤도 수정과 관련되는 에너지가 적외선 및 전파 영역 정도에 해당하며, 수많은 광자들이 자유-자유 천이를 겪는 과정에서 방출되는 복사가 합쳐져 연속 전파 복사를 방출함.



- H II 영역의 연속 복사는 전자의 평균 운동에너지에 대응하는 온도에 따라 결정되며, 전파 영역대의 다른 연속 복사인 싱크로트론복사와 구별하기 위해 열 전파 방출 또는 열적 제동 복사라고 부름.
- H II 영역의 연속 전파복사의 스펙트럼은 광학적 깊이에 따라 크게 두 부분으로 나뉜다.
  - i. 광학적 두께가 얇은 주파수 대역 :  $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ 에서  $\alpha$ 는 0.1정도의 크기를 가짐.
  - ii. 광학적 두께가 두꺼운 주파수 대역 : 저주파수대의 흑체복사와 같이  $F_\nu \propto \nu^2$ 의 관계를 보임



<그림 15-8> 비열적 싱크로트론 복사와 열적 자유-자유 천이 복사 스펙트럼

☆ 열적 자유-자유 천이와 광학적 두께

- <그림 15-8>을 보면 광학적 깊이가 대략 1이 되는 1,000MHz를 경계로 광학적 두께가 두꺼운 영역과 얇은 영역으로 나뉜다.
- 두 영역에서 주파수가 더 짧은 영역(즉, 광학적 두께가 두꺼운 영역)은 원천함수와 같은 복사를 방출하며, 열평형의 경우 원천함수는 어떤 온도를 가진 흑체의 열적 플랑크 복사와 같다. ( $I_\nu = S_\nu$ )
- 파장이 긴 영역에서 플랑크 함수는 레일리-진스 분포라고 알려진 근사에 의해  $B_\nu \propto \nu^2$ 의 관계를 가지므로(식(8-38a)참조), 대수-대수 도형에서 기울기는 2가 된다.
- 광학적 깊이가 얇은 영역에서 방출 세기는  $I_\nu = S_\nu \tau$ 의 관계를 가지며, 레일리-진스 분포에서 광학적 깊이는 주파수와 대략  $\tau \propto \nu^{-2}$ 의 관계를 가진다.
- 원천함수가  $\propto \nu^2$ 이므로 광학적 깊이에 의한 효과( $\propto \nu^{-2}$ )를 고려하면, 이 영역에서 기울기는 거의 일정하다.  $\Rightarrow$  실제 관측 결과는 위에서 나온 것과 같이  $\alpha=0.1$ 의 값을 가진다.

○ 방출측도(emission measure)

- H II 영역에서 발생하는 방출선은 결국 전자 개수 밀도와 H II 영역의 두께(또는 지름)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$E_m = \int_0^L n_e^2 dl = \langle n_e \rangle^2 L$$

- 만약 관측을 통해  $E_m$ 과  $L$ 이 결정될 수 있다면 우리는 평균 전자 밀도를 추정할 수 있다. (실제 관측값은 약  $10^3 \text{m}^{-3} \sim 10^9 \text{m}^{-3}$ 이다.)



### 3) 초신성 잔해

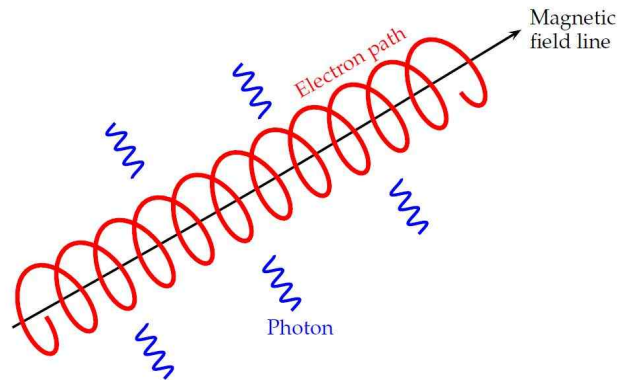
- 무거운 별이 죽으며 중심핵은 수축하고 외곽층은 팽창하여 분출되며, 가스 구름으로 남게 되는데, 이 가스 구름이 초신성 잔해이다.
- 초신성에서 고속으로 튀어나온 물질이 팽창하면서 주위의 기체와 티끌을 휩쓸고 지나갈 때 충격파가 생기면서 기체 원자들을 들뜸 상태로 올려놓거나 전리시킨다.  
⇒ 그 결과 주위의 기체가 발광성운(초신성 잔해)으로 관측된다.
- 초신성에서 방출되는 엑스선도 주위 기체를 전리시키는데 한 몫을 한다.

#### ① 초신성 잔해의 특징

- 가시광으로도 관측되지만 대부분 전파영역에서 검출된다. ⇒ 전파영역 성간소광이 적기 때문에
  - 퍼져있는 천체로 관측되며 종종 편광되어 있다.
  - 주파수가 커짐에 따라 전파 밝기가 감소한다.(<그림 15-8> 참조) ⇒ HII 영역은 거의 일정하다.
- ☆ ii와 iii은 싱크로트론 복사에 의한 현상이다.

#### ② 초신성 잔해의 방출 기작 : 싱크로트론 복사

- 싱크로트론 복사  
: 비열적 복사로서, 상대론적 속도를 가지는 매우 고에너지의 전자들이 자기장에 의해 나선운동을 하며 가속도를 갖게 되고 그로 인해 에너지를 잃어버리며 내놓는 복사
- 싱크로트론 기작은 모든 파장영역에서 연속 스펙트럼을 방출할 수 있지만, 전자의 운동에너지에 따라 관측되는 주요한 파장영역이 결정된다.
- 상대론적 속도로 움직이는 전자는 좁은 원뿔 내로만 복사를 내놓으며, 관측자의 시선방향에서 이 원뿔은 한 번만 지나간다. 하지만 무수한 전자들이 시선방향으로 연속해서 복사를 내놓으므로, 하나하나를 구별해서 볼 수는 없다.



#### ③ 우리은하에서 관측되는 초신성 잔해의 분류

- ┌ 고리 모양의 구조를 뚜렷하게 보이는 것 : 초신성 I 형과 관련됨.
- └ 모양이 불규칙적이고 중앙부가 밝게 빛나는 것 : 중앙에 항상 펄서가 발견됨, 초신성 II 형과 관련됨.

### 4) 행성상성운(planetary nebula)

- AGB(점근거성가지) 이후 거성의 열핵동에 의해 생긴 초강풍에 별의 외곽 껍질이 날아가며 생긴 발광체
- 망원경으로 관측할 때 행성과 비슷하게 둥글고 녹색을 띤 원반 또는 원광 같이 관측되어 '행성상'이란 표현이 붙게 되었다.

#### ① 행성상성운의 들뜸 기작

- 매우 고온의 중심별에 의한 복사와 높은 기체 밀도에 기인하는 원자-전자-이온 간 충돌  
⇒ 높은 기체 밀도란 것은 상대적인 의미로 대표적 성간기체인 HII 영역에 비해 높다는 의미이다.

#### ② 행성상성운의 금지선

- 행성상성운에서 볼 수 있는 강한 선은 OIII, OII, NeIII 등으로, 이 선들은 준안정 상태인 들뜸 상태에서 바닥상태로 되가라앉을 때 내놓는 금지선이다.
- 행성상성운의 금지선은 전자가 하나 내지 두 개가 떨어져나간 이온에서 기인한다.  
(cf. 태양 코로나의 경우 전자를 9개 내지 그 이상 잃은 이온에서 금지선이 방출된다.)
- 많은 별들이 AGB 단계에서 백색왜성이 되기 전 행성상 성운의 단계를 지나지만 관측되는 행성상 성운의 개수가 적은 것은 이 단계에 머무는 시간 척도가 겨우 5만년 정도로 짧기 때문이다.

○ H II 영역과 행성상 성운의 비교

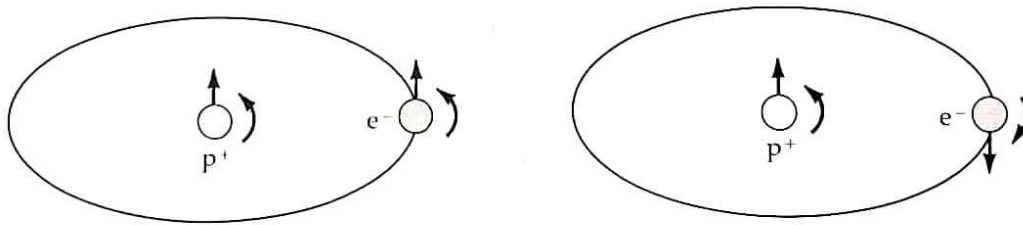
	H II 영역	행성상성운
모양	산만하게 퍼진 모습	H II 영역에 비해 뭉쳐있음
표면밝기	더 어둡다	더 밝다
기체의 밀도	더 낮다	더 높다
강한 선	H II, He I	H, He, OIII, OII, NeIII

☆ 위 표는 성간 기체로서 H II 영역과 행성상성운을 단순 비교한 것이다.

5) 성간 전파선

① 21cm 중성수소선 : 진동수 1.420406GHz

- 중성수소의 바닥상태는 양성자와 전자가 가진 '고유 스핀'에 의해 매우 적은 에너지 차로 벌어져 있는 2개의 준위로 분해된다.
- 양성자와 전자의 스핀 운동은 자기장을 만들고, 이 자기장은 '자기능력'이라는 개념으로 그 입자의 각운동량에 비례하는 하나의 벡터로 표시된다. (<그림 15-12>에서 양성자와 전자에 표시된 화살표)



<그림 15-12> 수소원자의 스핀 정렬

- <그림 15-12>에서 양성자와 전자의 자기능력 방향이 같은 상태(왼쪽)가 반대 방향인 상태(오른쪽) 보다 더 높은 에너지 준위에 있다.(즉, 왼쪽이 더 들뜬 상태이며, 오른쪽은 더 안정한 상태이다.)
- 이와 같이 중성 수소의 바닥상태에서 가지는 준위 구조를 '초미세 분리'라고 하며, 보다 들뜬 상태(왼쪽)에서 보다 낮은 상태(오른쪽)으로 자발천이 할 경우(즉, 전자의 스핀이 뒤집힐 경우) 매우 낮은 에너지의 광자를 방출한다. ⇒ 이 광자가 '수소의 21cm 선(진동수 1.420406GHz)'이다.

☆ 요약하면 바닥상태 중성수소의 전자 스핀 방향이 변하며 내놓는 금지선이 21cm선이다.

- 21cm선은 강하게 금지된 천이로서 자발천이가 1,100만 년에 한 번 꼴로 일어나며, 수소 밀도도 아주 낮지만, 우리은하 규모에서 전체 수소가 아주 많기 때문에 관측이 가능하다.
- 21cm선 관측 결과로 성간 기체가 밀집된 지역, 즉 우리 은하의 구조에 대해 추정할 수 있었다.

② 분자선

- 성간에는 CO, CN, OH와 같은 간단한 분자에서 포름알데히드( $H_2CO$ ), 메탄올( $CH_3OH$ )과 같은 비교적 복잡한 유기분자들도 있다.
- 성간 분자는 분자들이 전파 영역에서 내놓거나 흡수하는 선복사 관측을 통해 존재를 확인할 수 있다.
- 분자선은 고밀 성간운의 내부를 탐사하는데 매우 유용하게 쓰이며, 성간 매질 환경에서 화학적 변화를 추정하는 데 중요하다.

○ 성간 분자 생성에 있어 성간 티끌의 역할

- ┌ 촉매 역할 : 간단한 원자, 분자들이 부착하기 쉬워 분자 또는 원자간 중매를 한다.
- └ 보호 역할 : 자외선을 차단하여 다시 해리될 위험을 막는다.

- CO분자는 성간 어디에서나 쉽게 볼 수 있으며, H<sub>2</sub>와 밀접한 관련이 있어 CO분자선을 관측을 통해 H<sub>2</sub>의 함량을 추정할 수 있다.  $\Rightarrow$  H<sub>2</sub>는 전파 영역에서 천이가 없기 때문

#### ○ 암흑 성간운(또는 암흑 성운)

- 대부분의 성간 분자들이 발견되는 고밀, 저온의 분자운이다.
- 높은 밀도는 두 가지 관점에서 분자들이 잘 생성되게 한다.
  - i. 원자들 사이의 충돌이 빈번하여 분자가 만들어지기 쉽다.
  - ii. 티끌이 많아 자외선을 잘 차단하므로 다시 해리될 위험도 적다.
- 즉, 암흑 성운은 많은 분자와 티끌, 기체들이 모여 있어 장차 별이 탄생할 수 있는 곳이다.
- 많은 경우 성간운 주위에 H II 영역이 존재한다.(예. 오리온성운)

☆ 천천서에서 성간운을 저밀 성간운과 고밀 성간운으로 나누며, 그 주위에 H II 영역이 존재한다고 표현하는데, 기본천문학에서는 성간분자가 발견되는 영역을 고밀의 암흑성운과 H II 영역 내부의 분자운으로 분류한다. 미묘하게 다르게 분류하고 있는 것 같긴 하지만, 적어도 모든 고밀 성간운 주변에 H II 영역이 있는 것은 아니라는 사실은 같다고 할 수 있다.

- 성간 분자운은 전파망원경을 통해 주로 방출선을 관측하며, 최근에는 인공위성을 활용하여 광학관측의 한계를 극복하고 있다.

#### ○ 전파의 세기

- 안테나 온도( $T_A$ )로 표시한다.  $T_A$ 는 전파의 세기에 비례하도록 정의된 온도이다.

플랑크 함수  $B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp[h\nu/kT] - 1}$ 에서  $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$ 인 전파영역 레일리-진스 근사하면

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{h\nu/kT} = \frac{2\nu^2 kT}{c^2} \text{의 관계를 얻는다. 즉, } B_\nu \propto T_A \text{의 관계를 알 수 있다.}$$

- $T_A$ 의 크기는 매우 낮다.  $\Rightarrow$  신호가 미미하여 충분한 보정이 필요하다.(즉, S/N비가 낮다)

[ CO등 강한 분자선 : ~ 10K 이내  
일반적 분자선 : ~ 1K 이내

- 분자선의 방출기작 : 주로 mm파에 대하여 고려하면 분자의 회전모드 변화에서 일어나는 천이, 즉, 회전 에너지의 변화로 분자선을 방출한다.

$$E_J = BhJ(J+1), (J: \text{회전양자수}, B: \text{회전상수}, h: \text{플랑크 상수})$$

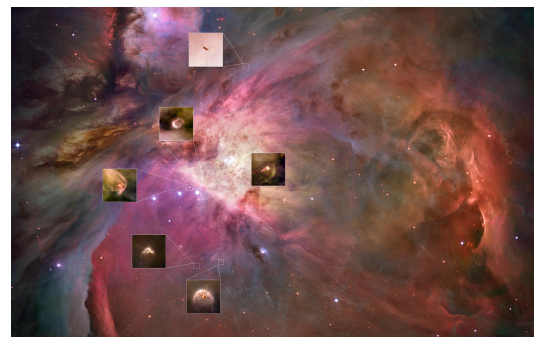
- 회전 천이에 의한 에너지로 방출되는 전자기파의 진동수는 아래와 같다.

$$\nu_J = \frac{E_{J+1} - E_J}{h} = 2B(J+1)$$

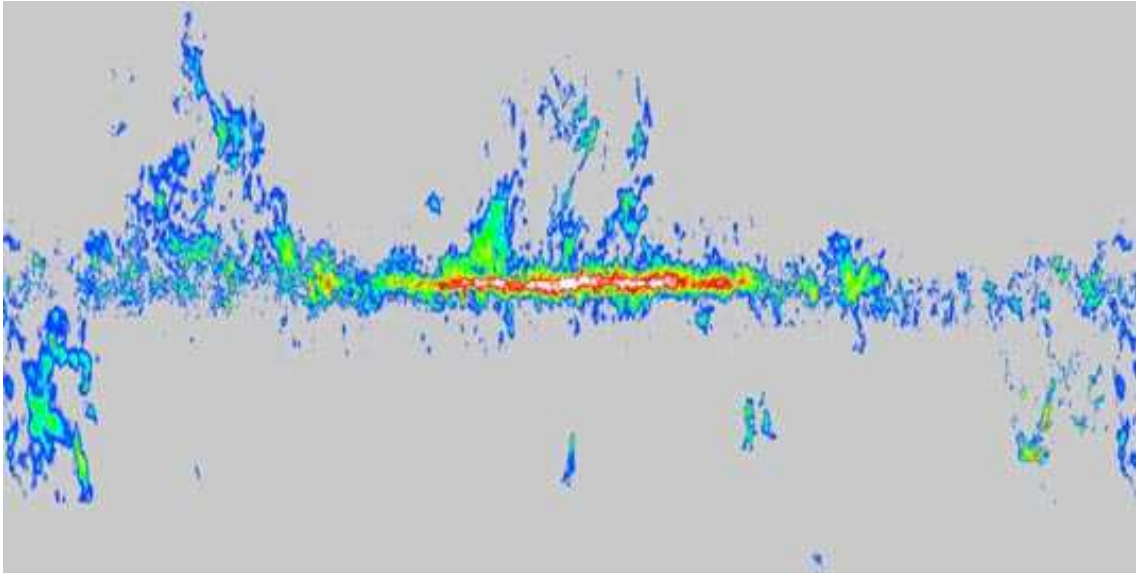
#### ③ 거대 분자운(giant molecular cloud)

- 거대 분자운의 복합체가 성간물질의 거의 대부분을 구성함.
- 거대 분자운의 특징
  - i. 주로 H<sub>2</sub> 분자로 이루어져 있다.
  - ii. 평균 밀도는 수억 m<sup>-3</sup> 정도이나 중심핵은 수십억 m<sup>-3</sup> 정도로 중심핵의 밀도가 아주 높다.
  - iii. 온도는 10K 정도로 극도로 낮다.
  - iv. 질량이 보통 10<sup>5</sup>M<sub>☉</sub> 정도이다.

- 거대 분자운은 별이 생성되는 곳이라고 여겨짐. ex) 오리온 성운



<그림>오리온 성운



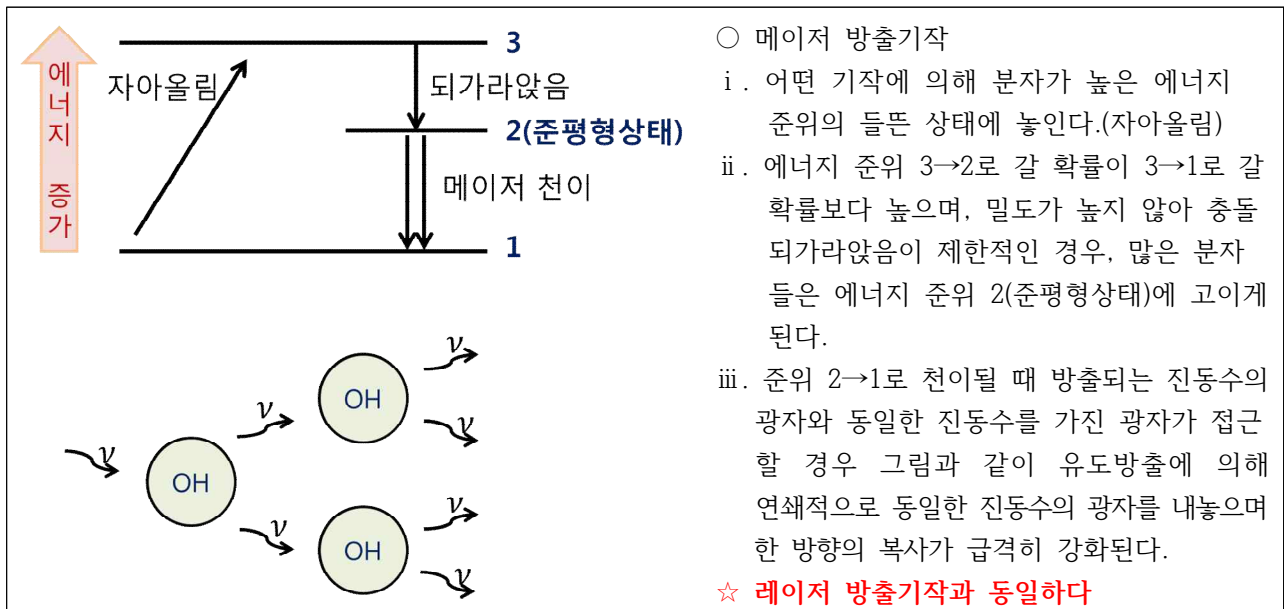
<그림>은하계 분자 지도, 출처 : 찬드라 X-선 위성(<https://chandra.harvard.edu/> )

#### ④ 분자 메이저

##### - 메이저(microwave laser)

: 어떤 기작에 의해 특정 준위로 올려진 분자들이 준평형 상태에 머물다가 저준위로 다시 유도전이 되면서 내놓는 복사가 점차 증폭되는 현상

☆ OH나  $H_2O$ 와 같이 분자운에서 발견되는 분자선의 강도를 열운동으로 설명하기 위해서는 너무 높은 온도가 필요하다.(약  $10^{13}K$ ) 하지만 실제 분자운의 온도는 아주 낮기 때문에 분자들을 들뜨게 하는 다른 기작이 필요하며, 이를 통해 에너지 준위에 따른 개수 분포의 역전이 존재해야 한다.(즉, 열적 평형 상태에 있지 않다.) 하지만 어떤 기작인지는 아직 완벽하게 밝혀지지 않았다.



##### - 대표적 분자 메이저

- └ OH 분자 : 1665 MHz, 1612 MHz
- └  $H_2O$  분자 : 22235 MHz
- └ SiO 분자 : 43122 MHz, 86243 MHz

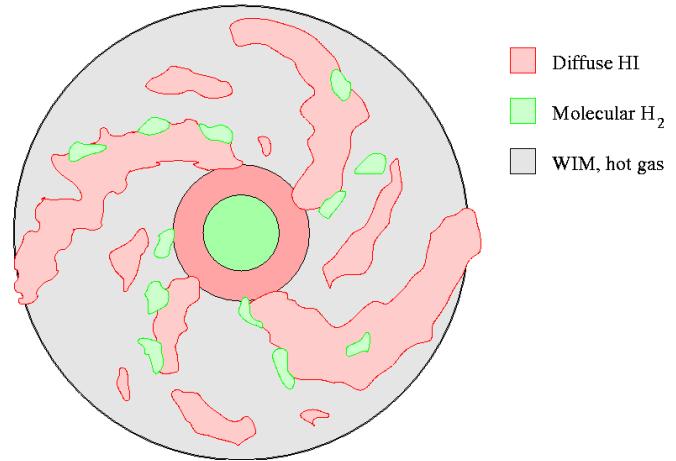
## 6) 성간운 간 기체

- 중성수소 구름들 사이를 메우고 있는 희박한 기체로 고온이며, 부분적으로 전리되어 있다.
- 전파 관측에서 검출되는 전리 기체 : 온도 약 10,000K, 평균 밀도는 약  $10^4$ 이온/ $m^3$
- 자외선 또는 엑스선 관측으로 검출되는 전리 기체(코로나 성간기체) : 온도 약  $10^6$ K 정도

## 7) 성간기체의 진화

### ① 초신성 폭발의 영향

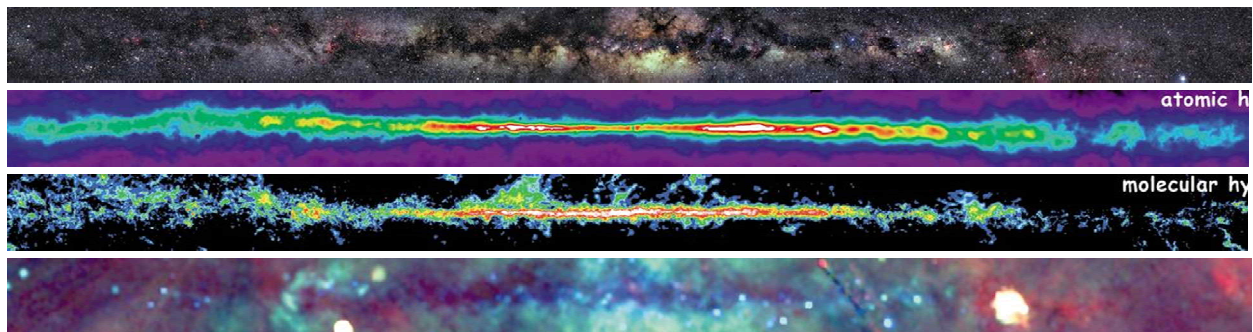
- 성간물질의 기체 역학적 변화에 가장 큰 영향을 미친다.
- 초신성 하나가 터질 때 약  $10^{44}$ J의 에너지와  $1\sim 50M_{\odot}$ 이 성간으로 공급된다.
- 초신성에서 불려 나온 물질이 성간 매질로 퍼져 나가며 주위의 물질을 압축·가열한다.
- 초신성의 팽창 구각은 수백 pc~ 3kpc까지 매우 큰 규모를 가진다.



<그림> 우리은하내의 가스 분포(평면도)

### ② 성간 매질의 각종 위상과 그들 상호 간의 진화적 관계

- H II 영역** : 고온의 젊은 별 주위에서 밝게 빛나는 전리수소 기체, (온도  $10^4$ K, 밀도  $5\times 10^3$ 이온/ $m^3$ )  
우리은하 내에서 총  $10^7M_{\odot}$ 정도의 기체가 차지하는 위상
- H I 영역/저밀의 중성수소 구름** : 저온·저밀의 중성수소 구름, (온도 100K, 밀도  $10^8$ 이온/ $m^3$ )  
우리은하 내에서 총  $3\times 10^9M_{\odot}$ 정도의 기체가 차지하는 위상
- 분자운** : 주로  $H_2$  분자로 구성된 구름으로 크기가 넓은 범위에 걸쳐 분포함.  
구름 하나의 질량이 수십억  $M_{\odot}$ , 온도 10K, 밀도  $10^9$ 분자/ $m^3$  정도임.  
성간에서 차지하는 공간 점유비는 1% 미만이지만 질량 면에서는 상당 부분 차지한다.  
고밀의 분자운에서 항성이 만들어진 후 주위에 남겨진 분자운이 H II 영역이 되기도 한다.
- 성간운 간 매질** : 비교적 고온의 기체로 중성수소가 대부분을 차지하고, 20%를 전리수소와 전자가 차지함. 이 위상의 기체가 낮은 온도에 있는 성간운을 에워싸고 있다.  
공간 점유율은 20%, 온도 5,000~10,000K, 밀도  $3\times 10^5$  원자/ $m^3$ ,  $5\times 10^4$  전자/ $m^3$
- 코로나 기체** : 극히 고온에다 매우 희박한 전리 기체로서 각종 성간 위상들 사이 곳곳에 스며있다.  
공간 점유율 50~70%, 온도  $10^6$ K, 밀도  $10^4$ 입자/ $m^3$  이하이다.



<그림>우리은하 성간물질 (위쪽부터 가시광, 21cm, CO분자선, X선 관측)

※ 출처 : [http://spiff.rit.edu/classes/phys230/lectures/ism\\_gas/ism\\_gas.html](http://spiff.rit.edu/classes/phys230/lectures/ism_gas/ism_gas.html)

### 3. 별의 생성

- 별의 탄생 과정은 중량급 항성( $10M_{\odot}$  이상)과 태양 규모의 항성으로 나누어 이해해야 한다.
- 가시광으로는 별 탄생의 산실인 고밀 성간운의 내부를 관측할 수 없으므로 적외선이나 전파 관측을 통해 그 과정을 엿볼 수 있다.
- 젊은 항성체(YSO) : 원시성과 주계열성을 총칭하는 말

#### 1) 기본 물리 지식

- 각운동량 문제 : YSO들이 형성되는 과정에서 어떻게 자신이 갖고 있던 각운동량을 제거할 수 있었는가

#### ① 중력 수축의 크기 척도

- 성간운 하나의 총 열에너지는 아래와 같이 주어진다.

$$E_{thermal} \doteq NkT \quad (N: \text{성간운 내부의 입자 개수}, kT: \text{입자 하나의 에너지(근사값)})$$

- 중력 수축이 일어나는 영역의 중력 퍼텐셜 에너지(U)는 아래와 같이 근사가 가능하다.

$$U \doteq -\frac{GM^2}{L}, \quad (M: \text{내부의 질량}, L: \text{영역의 크기})$$

- 비리얼 정리  $2E_{thermal} = -U$  를 이용하자.

- 성간운이 모두  $H_2$ 로 채워져 있다면 총수  $N=M/2m_H$ , ( $m_H$ : 수소 질량)이 되므로 비리얼 정리에 대입하여 정리하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{kT}{m_H} \approx \frac{GM}{L}$$

- 밀도가 균질하다고 가정하면  $M = \frac{4\pi}{3}\rho L^3$ 이므로 대입하면 아래의 관계를 얻는다.

$$\frac{kT}{m_H} \approx G\rho L^2 \quad \text{또는} \quad L \approx \left( \frac{kT}{m_H G \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \propto \left( \frac{T}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

⇒ 비리얼 정리는 계가 평형을 이룰 때의 물리량의 관계를 보여주므로, 위의 관계를 유지한다면 성간운은 평형을 유지하고 있을 수 있다. 하지만 위의 관계가 깨지면, 즉, 밀도가 증가하거나 온도가 낮아지면 L이 줄어들게 되므로 수축을 시작한다고 할 수 있다.

- 상수를 구체적 값으로 대입하면 위 식은 아래와 같다.

$$L = 10^7 m \left[ \left( \frac{T}{K} \right) \left( \frac{kgm^{-3}}{\rho} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (K, kgm^{-3} \text{은 단위이다.}) \Rightarrow \text{식(15-9)}$$

- 실제 거대분자운의 값,  $10K$ ,  $\rho=10^{-15}kgm^{-3}$ 을 대입하면 L은 대략  $0.1pc$ , M은 약  $10^{30}kg$  정도로 태양과 비슷한 별을 생성할 수 있는 것으로 나온다.



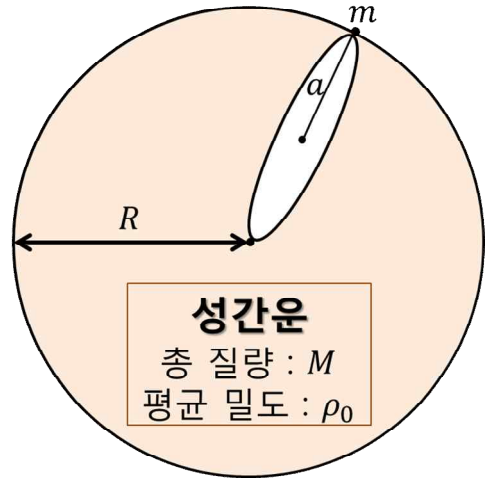
## ② 중력 수축 시간척도

- 성간운 중심부 수축의 폭주현상 : 물리적 조건이 중력 수축을 시작하기에 충분하여 수축을 시작했다고 할 경우, 압력을 무시한다면 충돌에 의한 속력 감소가 무시될 수 있다. 이 경우 중심부는 외곽부 보다 밀도가 빠르게 증가할 수 있고, 밀도의 증가는 수축시간을 단축시키며, 수축시간이 단축되었기 때문에 보다 빨리 밀도가 또 상승하는 결과가 나타난다. 즉, 중심부는 일종의 폭주 현상을 겪어 빠르게 밀도가 증가되고, 외곽부는 이미 단단히 뭉쳐진 중심부를 향해 자유낙하 운동을 하는 형국에 이른다.
- 질량  $M$ , 반지름  $R$ , 초기 밀도  $\rho_0$ 인 성간운의 표면에 자리한 질량  $m$ 의 질점을 생각하자.(오른쪽 그림 참조)
- 성간운이 수축하는 과정을 질량  $m$ 이 그리는 궤도운동으로 가정하자. (긴 반지름  $a=R/2$ , 이심률  $e \approx 1$ )
- 성간운의 질량  $M$ 은 밀도  $\rho_0$ 로 채워진 구이므로 아래와 같다.

$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho_0 = \frac{32\pi}{3} a^3 \rho_0$$

- 케플러 3법칙에 위 질량을 대입하면 아래와 같다.

$$P = \left( \frac{3\pi}{8G\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$



궤도주기  $P$ 는 질점이 중심까지 가는데 걸리는 시간, 즉, 자유낙하 시간의 2배이다.

즉, 자유낙하 시간척도  $t_{ff}$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$t_{ff} = \left( \frac{3\pi}{32G\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- 위 식에 구체적 물리상수를 대입하면 아래와 같다.

$$t_{ff} = 6.44 \times 10^4 s \left( \frac{\rho_0}{\text{kgm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}} \Rightarrow \text{식(15-10)}$$

- 앞에서 다룬 성간운의 평균 밀도가  $\rho_0 \approx 10^{-15} \text{kgm}^{-3}$ 이므로 이 성간운이 중력 수축을 마치는데 걸리는 시간은 대략  $10^5$ 년이 될 것이다.

### ○ 중력수축 시간척도 유도 방법2

- 수축하는 성간운에서 질량  $m$ 이 받는 힘은  $-\frac{GMm}{r^2}$ 이며, 가속도  $a = -\frac{GM}{r^2}$ 이다.

가속도를  $\vec{r}$ 방향 미분형으로 표시하면  $\frac{d^2r}{dt^2} = -\frac{GM}{r^2}$ 이 되고,  $t=0$ 일 때  $r=R$ 이라고 하면

$$\frac{d^2r}{dt^2} \approx -\frac{R}{t^2} \text{과 같으므로 위 식에 대입하면 } -\frac{R}{t^2} = -\frac{GM}{R^2} \text{이 된다. 정리하면}$$

$t = \sqrt{R^3/GM}$ 이 된다. 한편,  $\bar{\rho} \propto M/R^3$ 이므로 위 관계는 간단히 아래와 같다.

$$\therefore t \propto (\bar{\rho} G)^{-1/2}$$

- 즉, 식(15-10)과 동일한 관계를 얻을 수 있다.



### ③ 각운동량 : 회전 성간운의 수축

#### - 수축 과정

회전하는 성간운이 수축할 경우 성간운의 성분 입자들은 회전축에 점점 가까워진다.



각운동량 보존에 의해 회전축으로부터 거리가 가까워질수록 회전속도는 빨라지고, 원심력은 증가한다.



적도 부근의 입자들은 원심력과 중력이 어느 지점에서 평형을 이루며 거리를 유지하게 된다.



회전축 부근에 위치한 입자들은 빠른 속도로 성간운 중심으로 떨어져 쌓이게 되고, 적도 이외의 성분 입자들도 원심력과 중력이 균형을 이루지 못해 중심 및 적도면에 쌓이게 된다.



결과적으로 회전 성간운의 중력 수축은 회전 원반체를 남긴다.

- 각운동량 보존 법칙  $[m_i v_i r_i = m_f v_f r_f]$ 을 이용하여 우리 태양 정도의 성간운을 계산해 보면(반지름 0.1pc, 회전속도 1km/s) 최종 상태의 태양은 약  $5 \times 10^6 \text{ km/s}$ 의 회전속도를 가져야 한다.

⇒ 이 결과는 빛의 속도보다 빠른 것이므로 **중력 수축 과정 중 각운동량을 잃어버리는 기작**이 필요함을 시사한다.

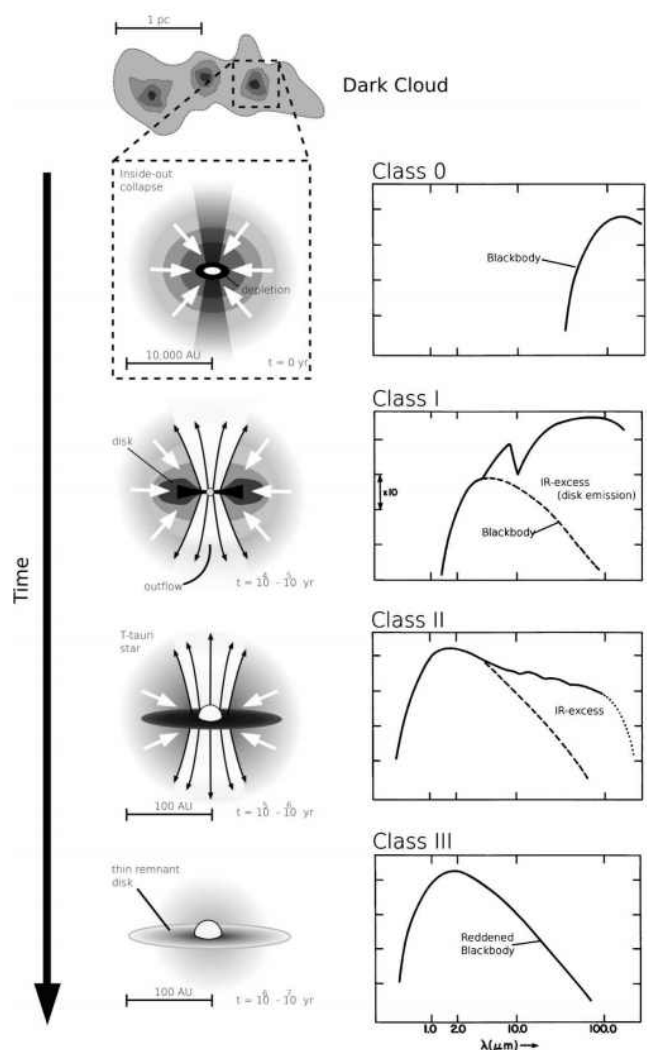
- 일반적인 성간운에서 중심핵 주위의 고리는 불안정하여 여러 개로 쪼개져서 다시 뭉쳐지며, 두 세 개의 큰 덩어리를 만든다.

⇒ 각 덩어리들은 각각의 항성으로 진화하며, 이는 다중성계가 많다는 사실을 뒷받침한다.

### ④ 자기장

- 중력수축 과정에서도 자기장의 세기는 보존됨.
- 반지름이  $r$ 인 구형의 성간운을 통과하는 자기장  $\vec{B}$ 가 있을 경우 성간운을 통과하는 총 자기장 플럭스는  $\Phi = \pi r^2 B$ 이다.
- 이 양은 성간운이 수축되어도 유지되어야 하며, 따라서 초기와 나중의 자기장 세기의 비는 반지름의 비가 된다.

$$\frac{B_f}{B_i} = \left( \frac{r_i}{r_f} \right)^2 \Rightarrow \text{식(15-11)}$$

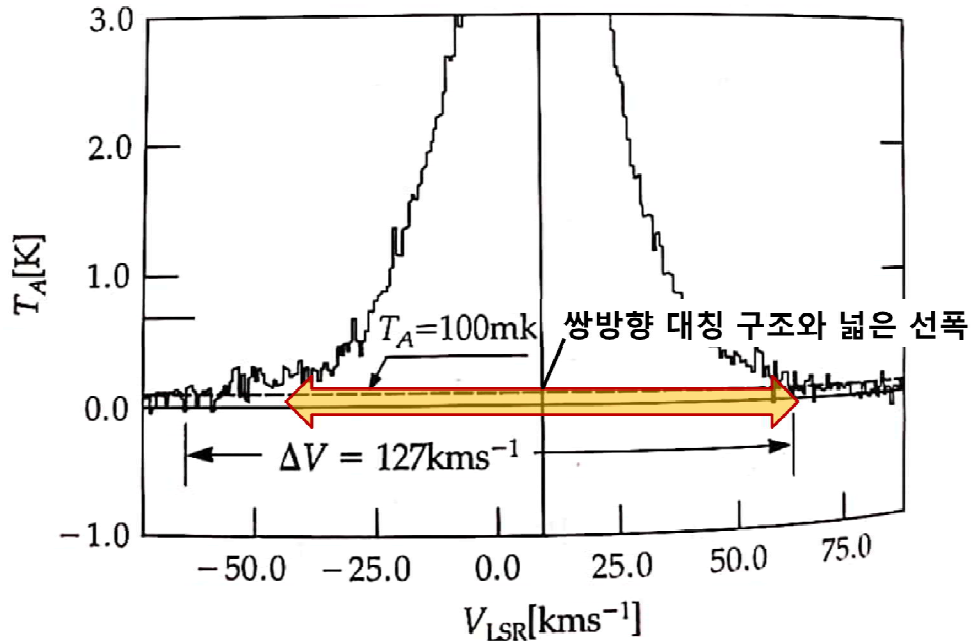


<그림>태양 질량 항성 생성 모형

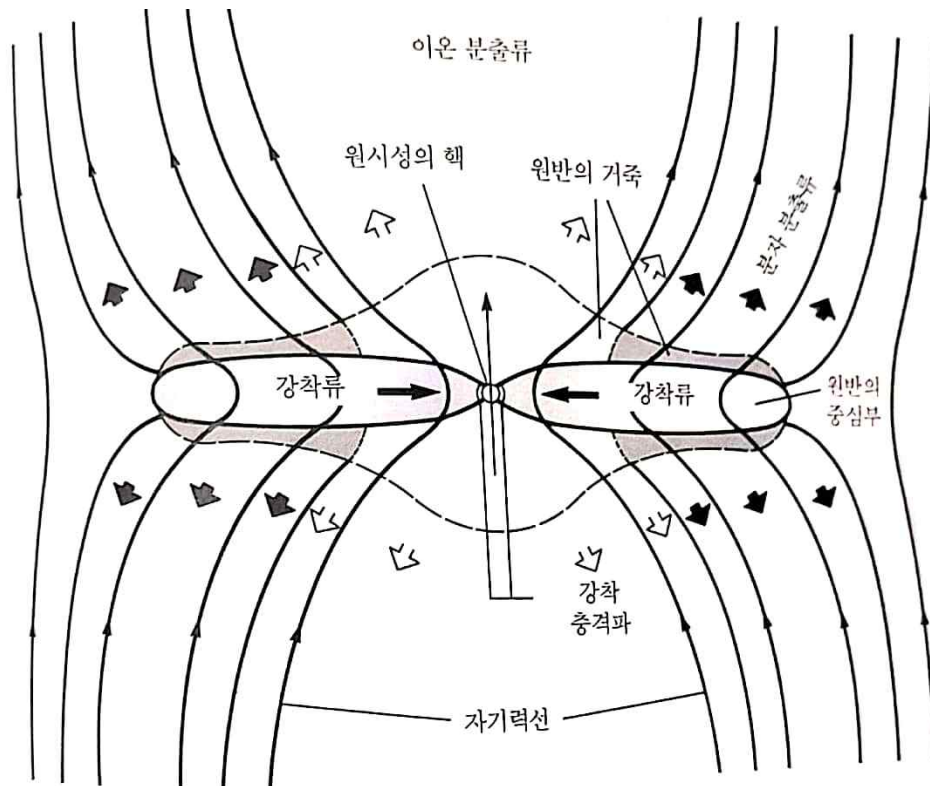
- 수축하며 성간운은 매우 강하게 자화되며, 자기장에 의해 유도 속박된 항성풍은 각운동량을 제거하고, 자기장을 분산하여 약화시킨다.

## 2) 분자 분출류와 별의 탄생

- 젊은 항성체 주위의 성간 분자선을 관측할 경우 확인할 수 있는 기체의 고속분출현상을 '분자 분출류'라고 하며, 항상 쌍방대칭을 이루고 있어 '분자 쌍극 분출류(BMO)'라고 한다.
- 실제 관측자료에서는 과도한 선평의 증가로 나타난다.
- 터져나가는 분자 분출류는 각운동량을 동반하여 원시성의 각운동량을 감소시키는 역할을 한다.
- ☆ 아직 밝혀지지 않은 부분이 많다고 한다.



<그림 15-16> 분자 분출류 : 오리온자리  $^{12}\text{CO}$  관측 결과



<그림 15-17> 원시성 주위 자화 회전 평판에서의 쌍극 분출 현상에 관한 모형

### 3) 중량급 항성의 탄생

- 관측적 사실을 바탕으로 한 시나리오

① 별들은 성간 분자운에서 영글어 자란다. ⇒ (관측)mm 파장대의 관측으로 확인



② 항성 생성 초기 단계에서 성간운은 자유낙하의 수축과정을 거치며, 내부 티끌의 온도는 30~50K에 이른다. ⇒ (관측)파장 10 $\mu$ m에서 가장 강한 적외선 복사 관측



③ 성간운 내부에 원시성이 형성되어 티끌의 온도가 약 1,000K까지 상승한다. ⇒ (관측)3 $\mu$ m 파장대로 적외선 복사의 극대가 옮겨감, 외곽부는 100K 수준이므로 30 $\mu$ m에서도 극대부가 보임.



④ 원시성이 주계열에 이르면 주위의 기체를 전리시켜 H II 영역을 형성한다. ⇒ (관측)마이크로파 관측



⑤ 고온의 전리기체가 팽창하고 온도가 하강한다. 티끌들이 모두 밀려나가면 중심별이 관측된다.  
⇒ (관측)전파영역에서 연속 복사 관측(H II 영역)

#### ○ 중량급 항성의 순차적 항성 생성 모형

- 분자운의 모양이 길쭉한 경우 한 쪽 끝에서 순차적으로 별이 생성되는 모형

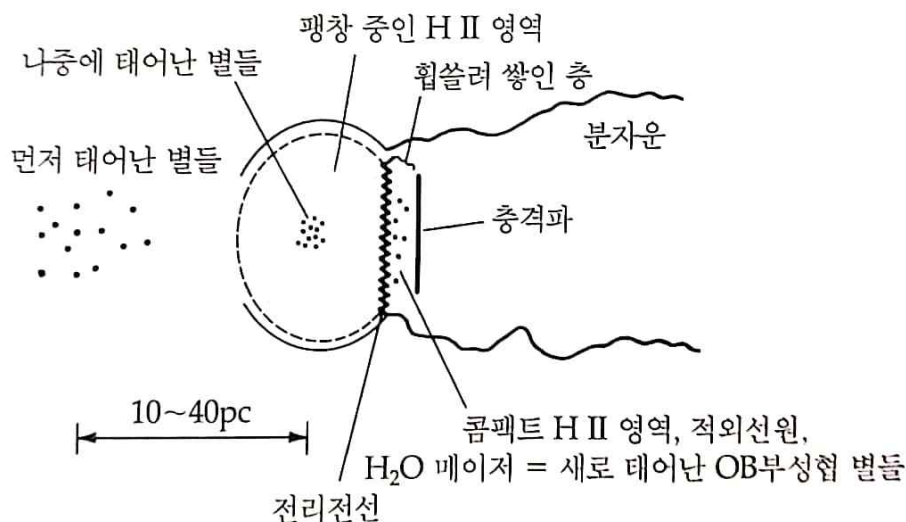
어떤 원인(보통 분자운 간의 충돌 또는 초신성 폭발)에 의해 분자운이 수축되며, 10여 개의 OB형 별들이 생성됨.



이 별들이 내놓는 자외선 복사에 의해 H II 영역이 만들어지고, H II 영역의 내부가 외부의 중성 영역보다 훨씬 더 뜨거우므로 팽창함.



팽창에 의한 충격파가 분자운 속으로 전파되며, 충격파가 지나간 직후방에 밀도가 증가하며 새로운 OB형 별이 탄생함..



<그림 15-22> 거대 성간분자운에서의 무거운 별들의 순차적 형성 모형