

입자물리학

180912

건국대학교 송정현



얼마나 멀리 떨어져 있는가?

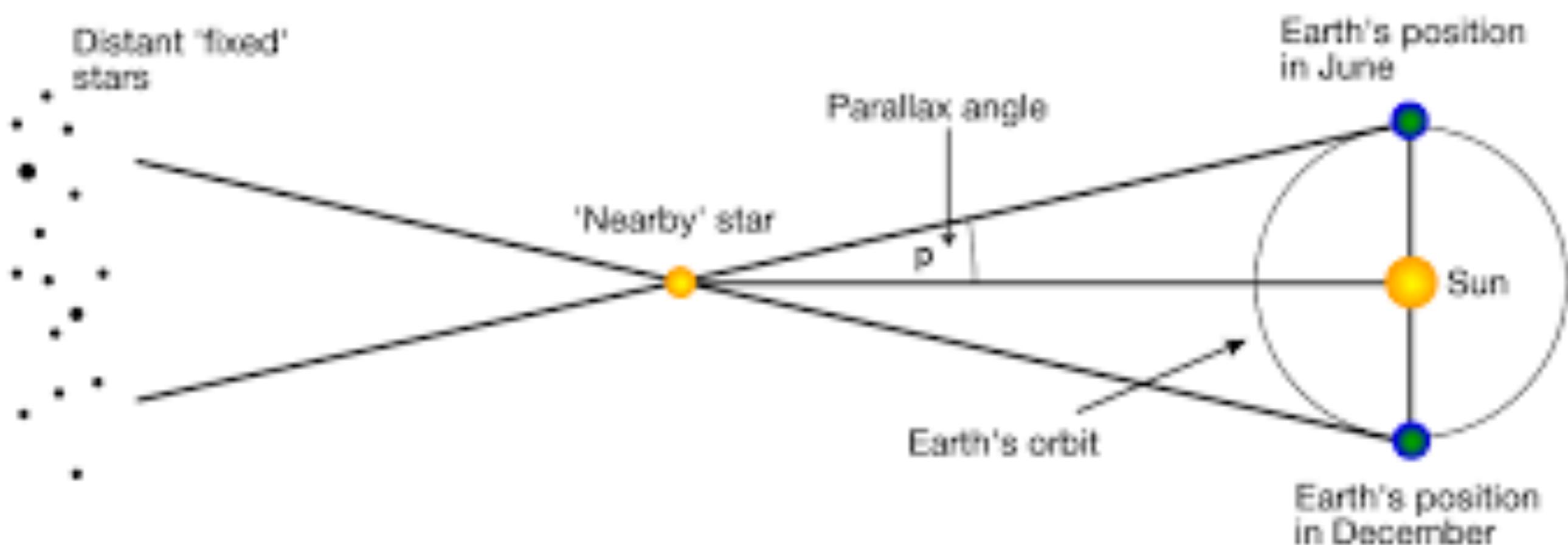
각도

- 360 degrees ($^{\circ}$) in a full circle
- 60 arc-minutes ('') in one degree
- 60 arc-seconds ('') in one arc-minute

직경 1cm인 물체가 1초로 보인다면
얼마나 멀리 떨어져 있는가?

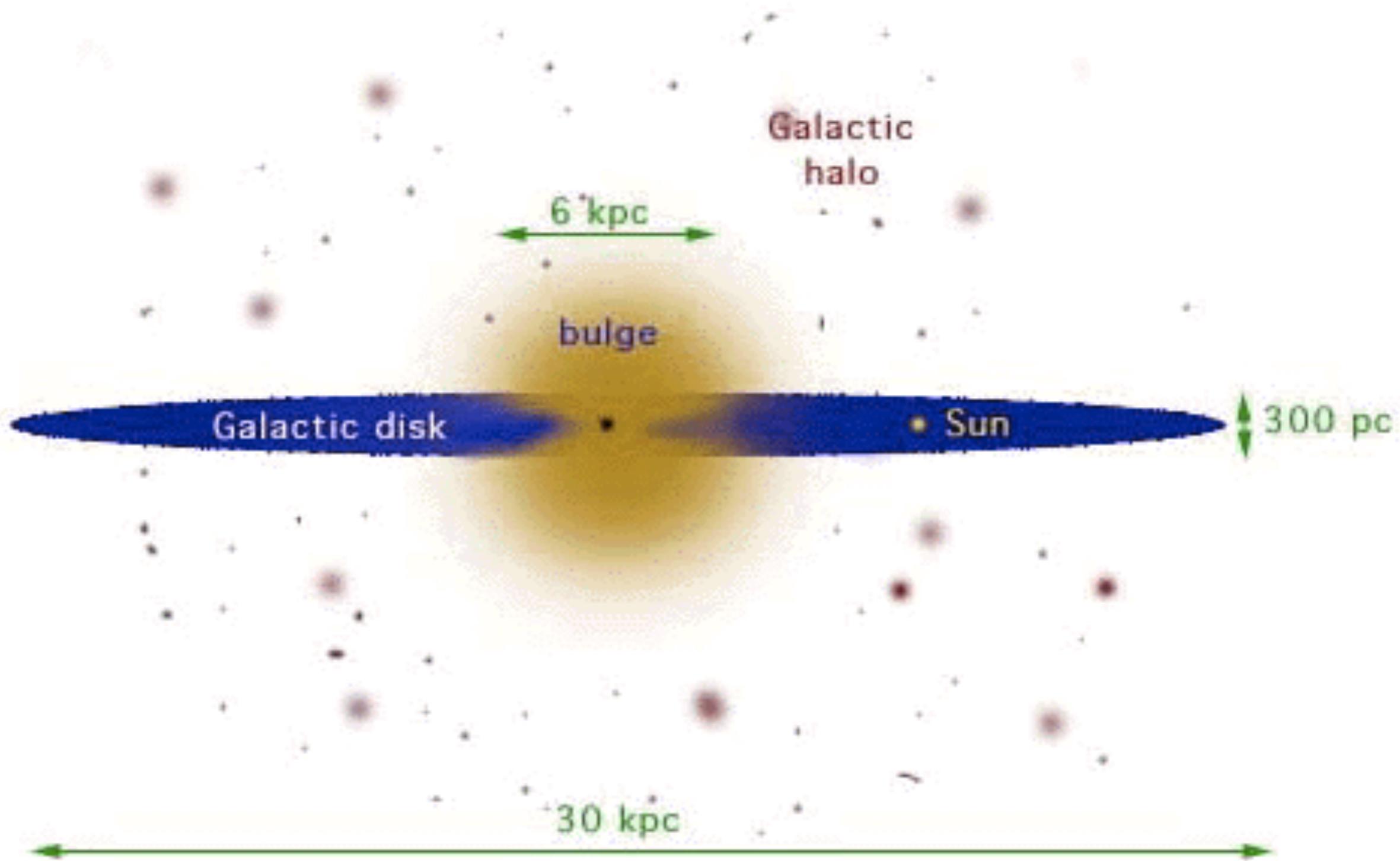
$$\tan \frac{\delta}{2} \approx \frac{\delta}{2} = \frac{d}{2D} \rightarrow D = \frac{d}{\delta} \sim 2\text{km}$$

연주 시차(annual parallax): p



천문학적 거리의 단위: 1 pc

- 1 pc: 연주시차가 1초인 거리
- $1 \text{ pc} = 3.3 \text{ ly} = 206,265 \text{ AU}$



별빛의 세기 측정 단위

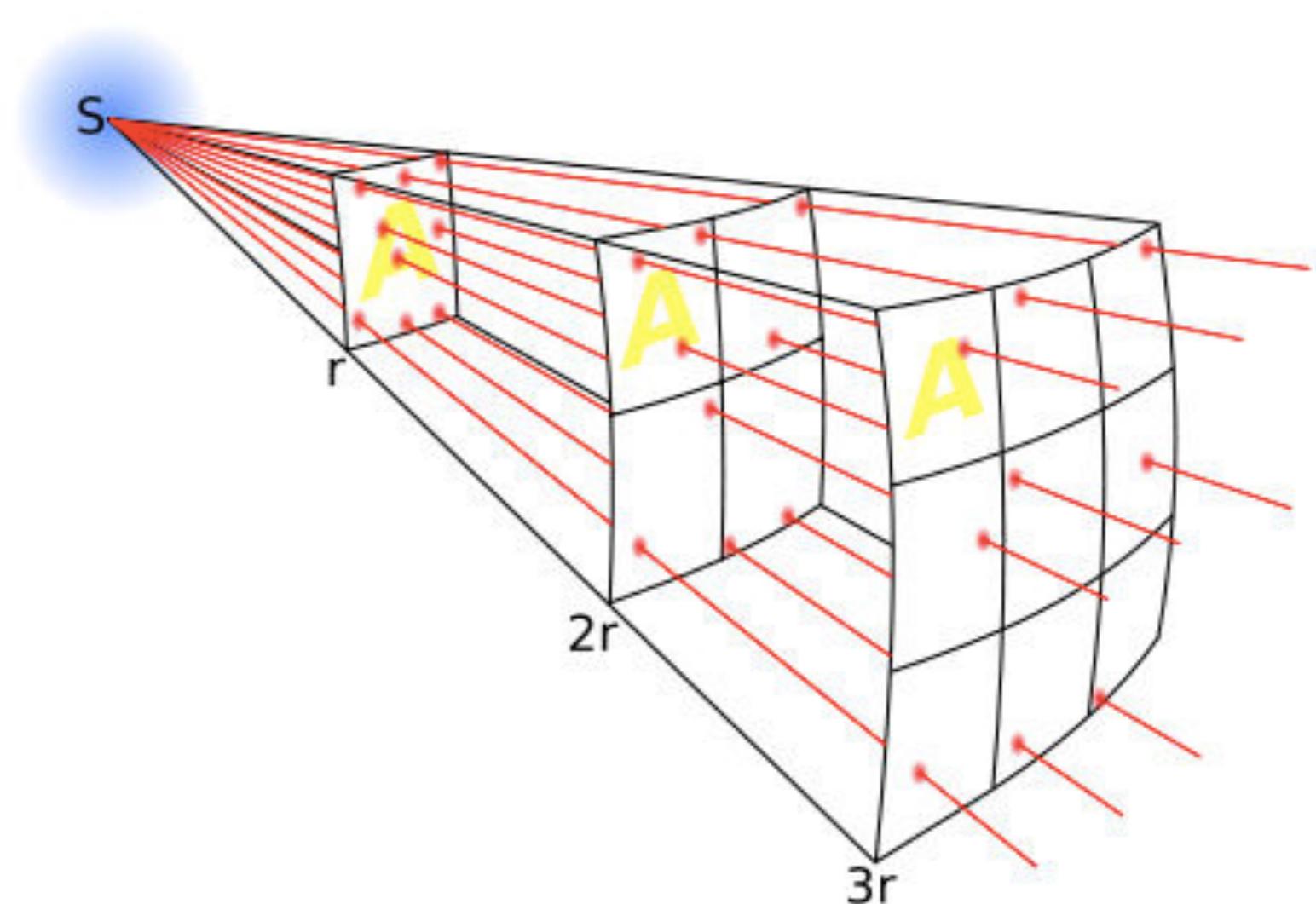
Intensity

- Intensity = Luminosity/area = Energy/time/area

우리가 측정

$$I = \frac{L}{4\pi d^2}$$

거리 2배?



Luminosity distance

- If L is known and I is measured, d can be measured. (밝기 거리)

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi I}} : \text{luminosity distance}$$

겉보기밝기과 절대밝기

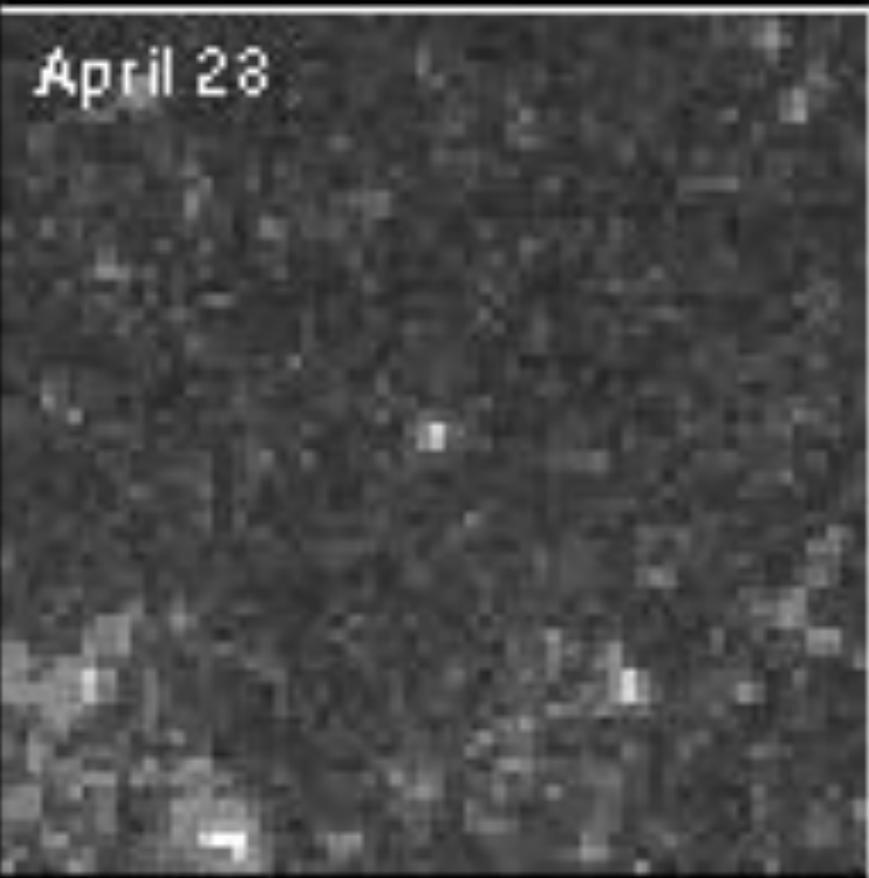
별이 너무 멀리 있어서
연주시차를 이용하여 별까지 거리를 구할 수 없다?

세페이드 변광성

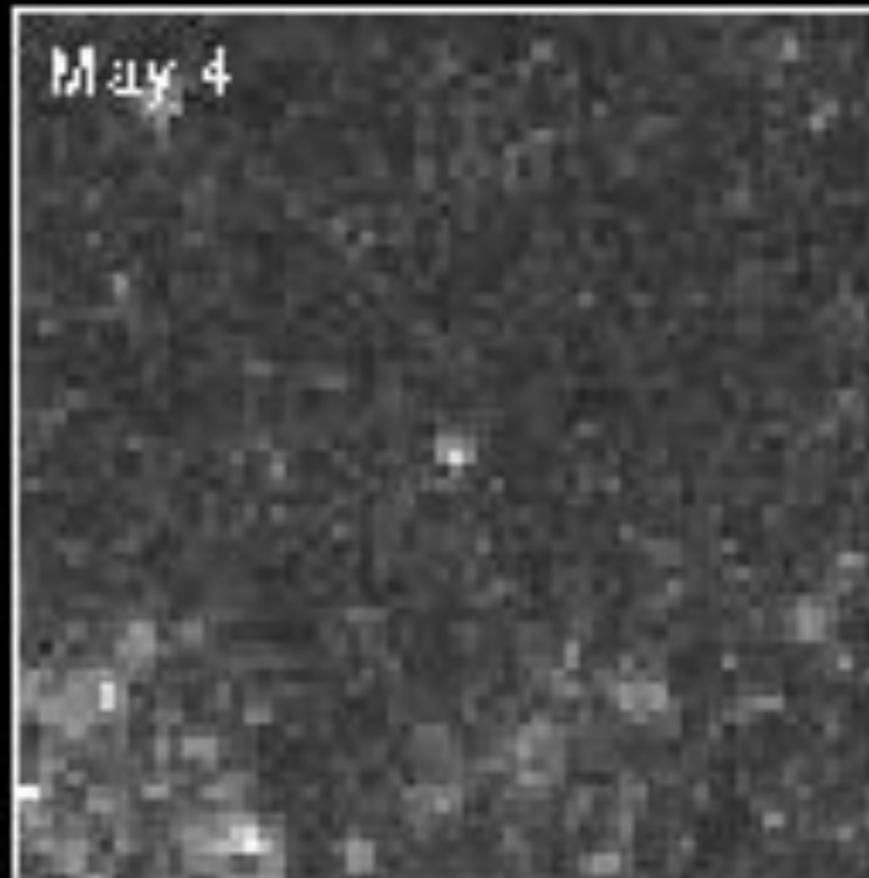
세페이드 변광성

- 변광성의 특정 유형
- 변광 주기와 겉보기광도 사이의 정확한 관계성

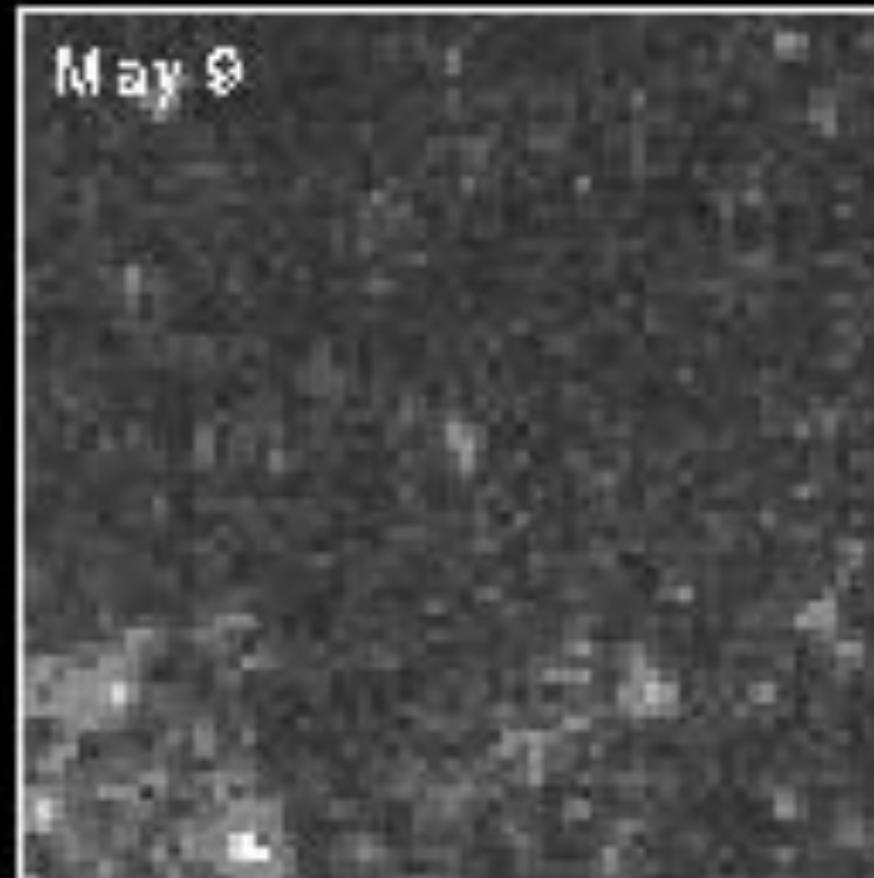
April 28



May 4



May 9



May 15



May 20

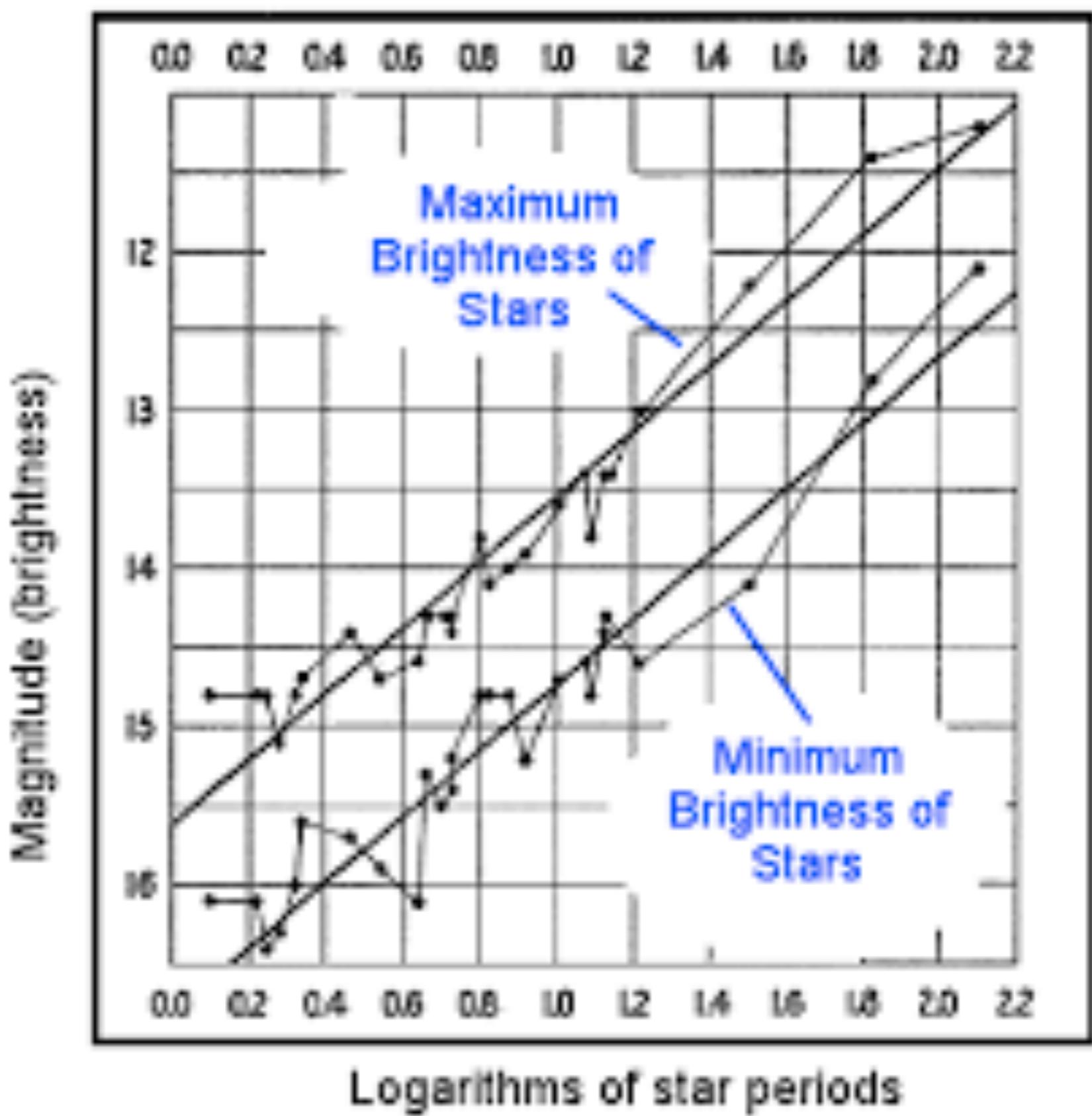


May 31



헨리에타 리비트 (Henrietta Leavitt: 1868-1921)

- 소마젤란 성운을 찍은 사진 분석
- 1777개 변광성 자료
- 이 중 47개 세페이드 변광성



- 겉보기밝기의 차이는 절대밝기의 차이
- but 절대값은 모름 (마젤란 성운까지 거리를 모름)

- 덴마크의 에나르 헤르츠스프룽 (Ejnar Hertzsprung, 1873~1967년)은 Henrietta Leavitt이 세페이드 변광성을 발견한 다음 해
- 은하수에 있는 13개 세페이드 변광성까지의 거리를 직접 측정



- 이제 세페이드 변광성의 주기와 “절대 광도” 사이의 관계를 알 수 있다.

- Hertzsprung 관측 결과 (우리 은하의 세페이드 변광성)
 - +
Leavitt이 발견한 소마젤란 성운 변광성
 - >
소마젤란 성운까지의 거리를 추정
- 우리 은하 밖 외계 은하에 대한 최초의 거리 측정
- 소마젤란 성운은 우리 은하에서 아주 가까운 작은 은하
(거리: 60.6 ± 1.0 [kpc](#))

마젤란 성운

- 우리 은하의 위성 은하
- 대마젤란 성운 (거리: 48.5 kpc)
- 소마젤란 성운 (거리: 60.0 kpc)



은하까지의 거리를 측정하는 강력한 도구

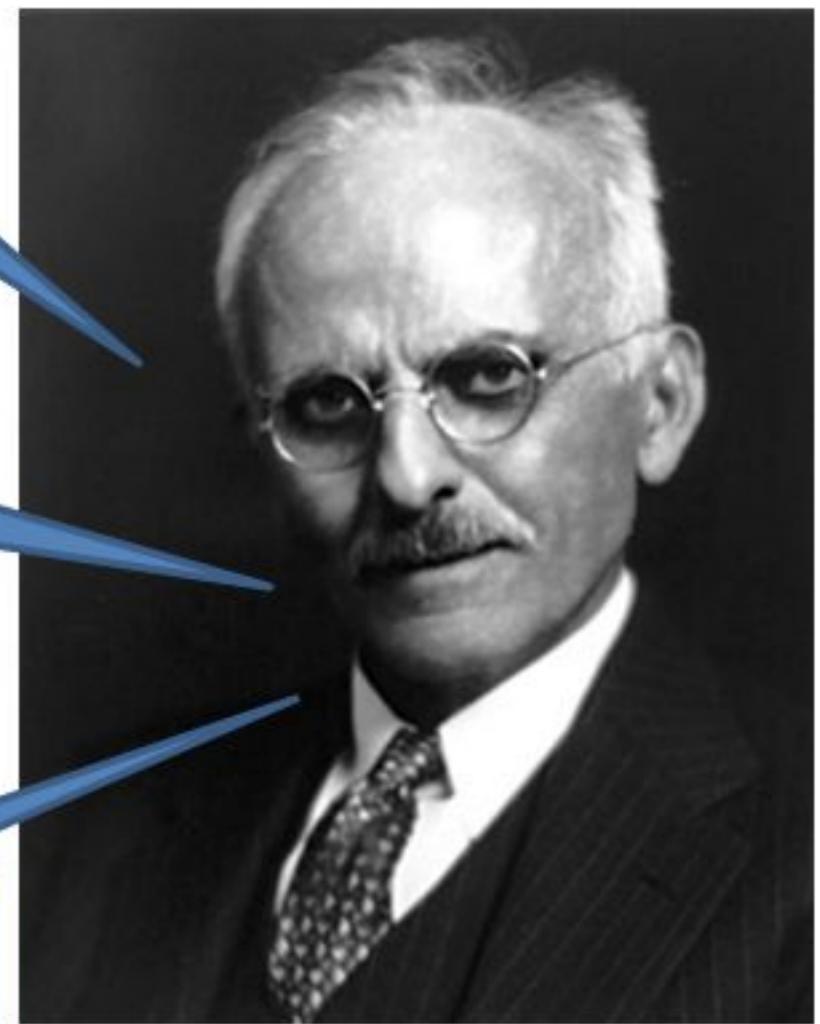
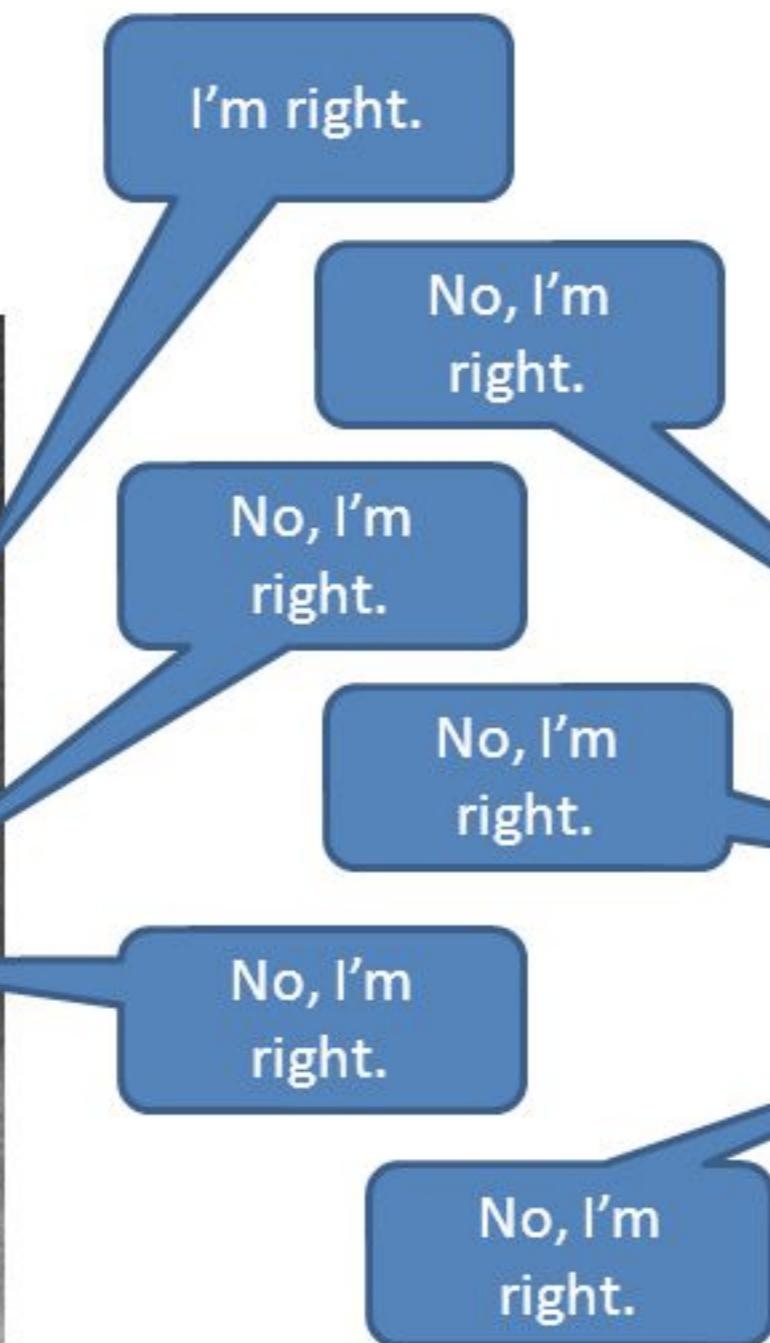
- 어떤 은하에서 세페이드변광성을 발견
- 주기-광도 그래프에서 그 세페이드 변광성의 절대등급 결정
- 관측에 의해 겉보기등급을 결정
- 그 변광성까지 거리를 계산
- 그 변광성이 그 은하에 포함되어 있다고 가정하면 세페이드 변광성까지 거리가 곧 그 은하까지 거리로 대략 추정

- 헤르츠스프룽의 방법은 미국의 할로 샐플리(Harlow Shapley, 1885~1972년)에게로 이어짐.



허블의 등장: Great Debate

The Great Debate...



새플리

커티스 (Curtis)

성운(星雲, nebula)의 정체?

- 성운: 별들의 구름
- 당시의 많은 과학자들: 우주에서 관측한 성운들이 우리 은하의 일부
- 우리 은하는 우주의 유일한 은하
- 샐플리는 이 입장의 대변자격
- 샐플리는 윌슨 산 천문대에서 허블의 고참

- 또 다른 과학자들: Cutis
- 성운이 우리 은하 바깥에 멀리 떨어져 있는 외계의 새로운 은하
- 성운이 우리 은하의 일부인가, 아니면 새로운 은하인가
- 관측이 결정

- 성운들까지의 거리 측정
- 성운들까지의 거리가 당시에 알려진 우리 은하의 크기보다 작다면?
성운들은 우리 은하의 일부
- 성운까지의 거리가 은하의 크기보다 훨씬 크다면?
성운들은 우리 은하와는 전혀 관계가 없는 새로운 은하

안드로메다 성운

캄캄한 반에는 맨눈으로 보임



- 허블은 1923년 당시 세계에서 가장 컸던 윌슨 산 천문대의 구경 100인치짜리 망원경으로 안드로메다 성운을 촬영
- 안드로메다 성운: 지구에서 맨 눈으로 보이는 성운

에드윈 파월 허블

(Edwin Powell Hubble, 1889-1953)

- 할아버지 마틴 허블에게서 천문학을 배움
- 중학교 때부터 권투를 시작.
- 전국고등학교육상대회에서 6번 우승
- 고등학생 때 별과 행성의 아름다움에 감동을 받고 화성에 관한 글을 지방 신문에 기고
- 시카고 대학에서 수학과 천문학으로 학사학위

- 옥스퍼드 대학에서 로드 장학생(Rhodes Scholars)으로 법률을 공부해 1912년 학사학위를 취득
- 1913년 켄터키 주에서 법률가로 일했으나 싫증을 느껴 그만둠
- 인디애나에 있는 뉴 알바니(New Albany) 고등학교에서 체육선생님로 근무하다가 그만둠
- 시카고대학으로 돌아와 여키스 천문대(Yerkes Observatory)에서 일하면서 천문학 박사 학위

- 1차 세계대전: 장교로 지원
- 몇 년 만에 소령으로: 초고속 승진
- 종전 후 카네기재단이 운영하는 윌슨 산 천문대(Mount Wilson Observatory)에 근무

- 상사가 할로 샐리



- 상사가 할로 샤플리
- 허블의 건방진 태도
- 샤플리는 반전평화주의자, 허블은 세계 대전에 참가
- 전쟁이 끝났는데도 늘상 군복을 고집, 파이프를 피우는 탓에 샤플리가 수도 없이 주의를 줬다고 한다.
- 샤플리가 2년만에 하버드로 떠남

- 허블은 1923년 당시 세계에서 가장 컸던 윌슨 산 천문대의 구경 100인치짜리 망원경으로 안드로메다 성운을 촬영
- 안드로메다 성운: 지구에서 맨 눈으로 보이는 성운

- 허블은 억세게 운도 좋았던지 이 사진에는 세페이드 변광성
이 하나 짹혔다.
- 안드로메다 성운에서 관측된 최초의 세페이드 변광성



Plate H348H; 11 Dec 1923

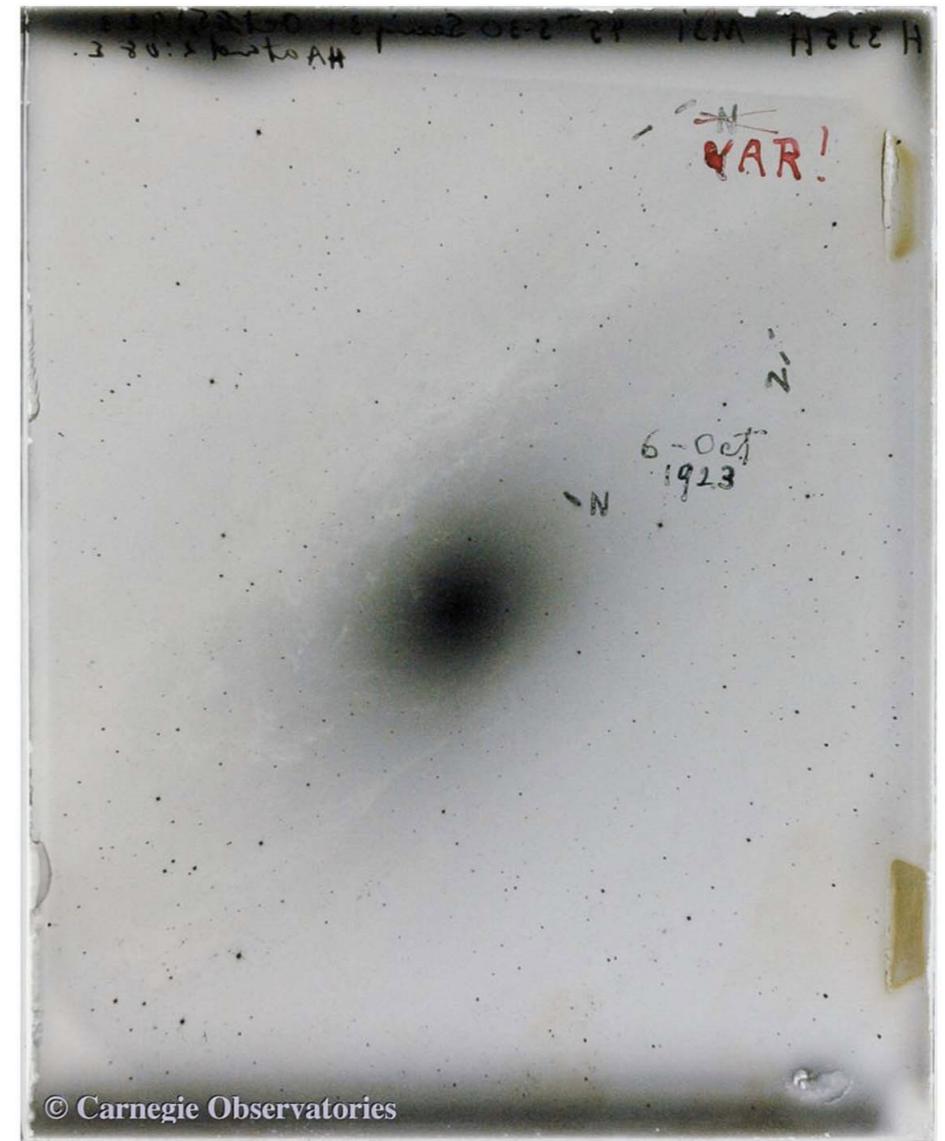


Plate H335H; 6 Oct 1923

© Carnegie Observatories

- 허블은 이 사진을 판독해 안드로메다 성운까지의 거리가 약 90만 광년이라고 계산
- 이 거리는 (현재 알려진 안드로메다 은하까지의 거리인 약 250만 광년보다는 짧긴 하지만) 우리 은하의 크기인 10만 광년보다 10배 가까이 큰 것이다.

- 안드로메다 성운이 우리 은하의 한참 바깥에 있는 천체임.
- 안드로메다 성운은 우리 은하처럼 수많은 별들을 지닌 또 다른 은하임
- 이후로 안드로메다 성운은 더 이상 ‘성운’으로 불리지 않고 안드로메다 ‘은하(galaxy)’로 불리게 되었다.

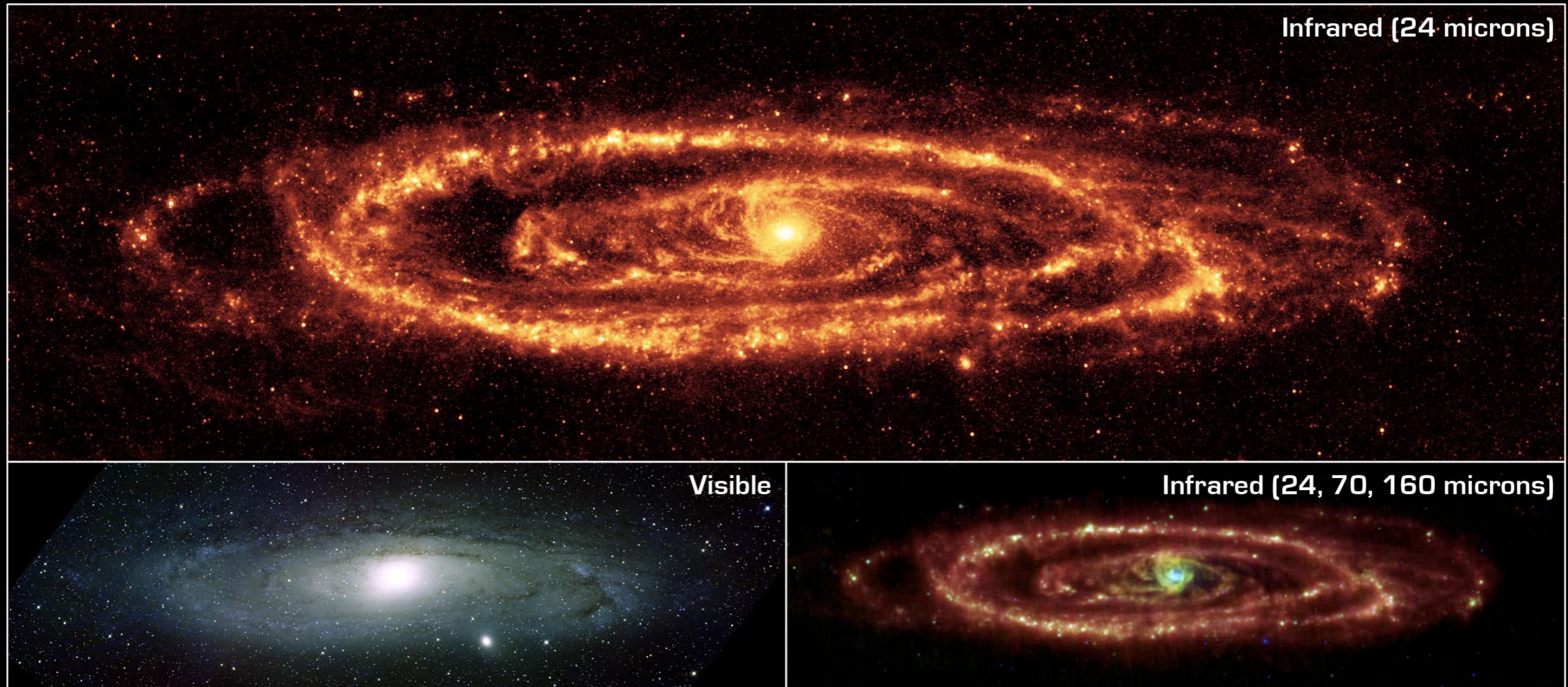
- 우주에는 수많은 은하가 가득하다허블은 자신의 관측 결과를 1924년 12월 23일자 <뉴욕 타임스>에 발표
- 샐플리는 허블의 발견을 두고
“이것은 내 우주를 파괴”
- 허블은 우리 은하 안에 갇혀 있던 그때까지의 우주관을 파괴
- 우리 은하 너머 무한히 뻣은 공간에 수많은 은하가 가득한 새로운 우주관을 창조

안드로메다 갤럭시

거리: 780 kpc



2005, NASA



Dust in Andromeda Galaxy (M31)
NASA / JPL-Caltech / K. Gordon (University of Arizona)

Spitzer Space Telescope • MIPS
Visible: NOAO ssc2005-20a

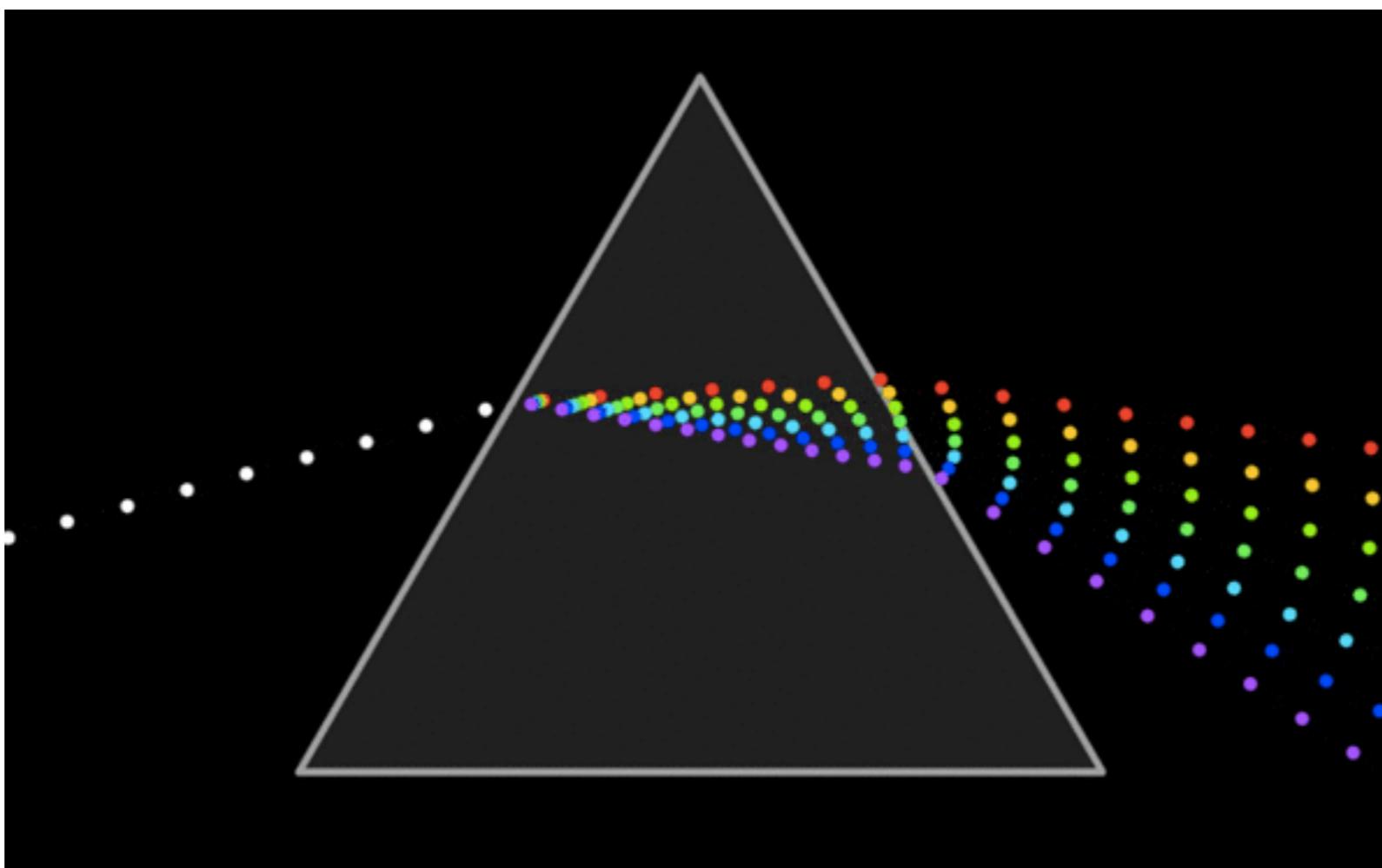
허블의 업적

우주론

분광학 + 도플러 효과

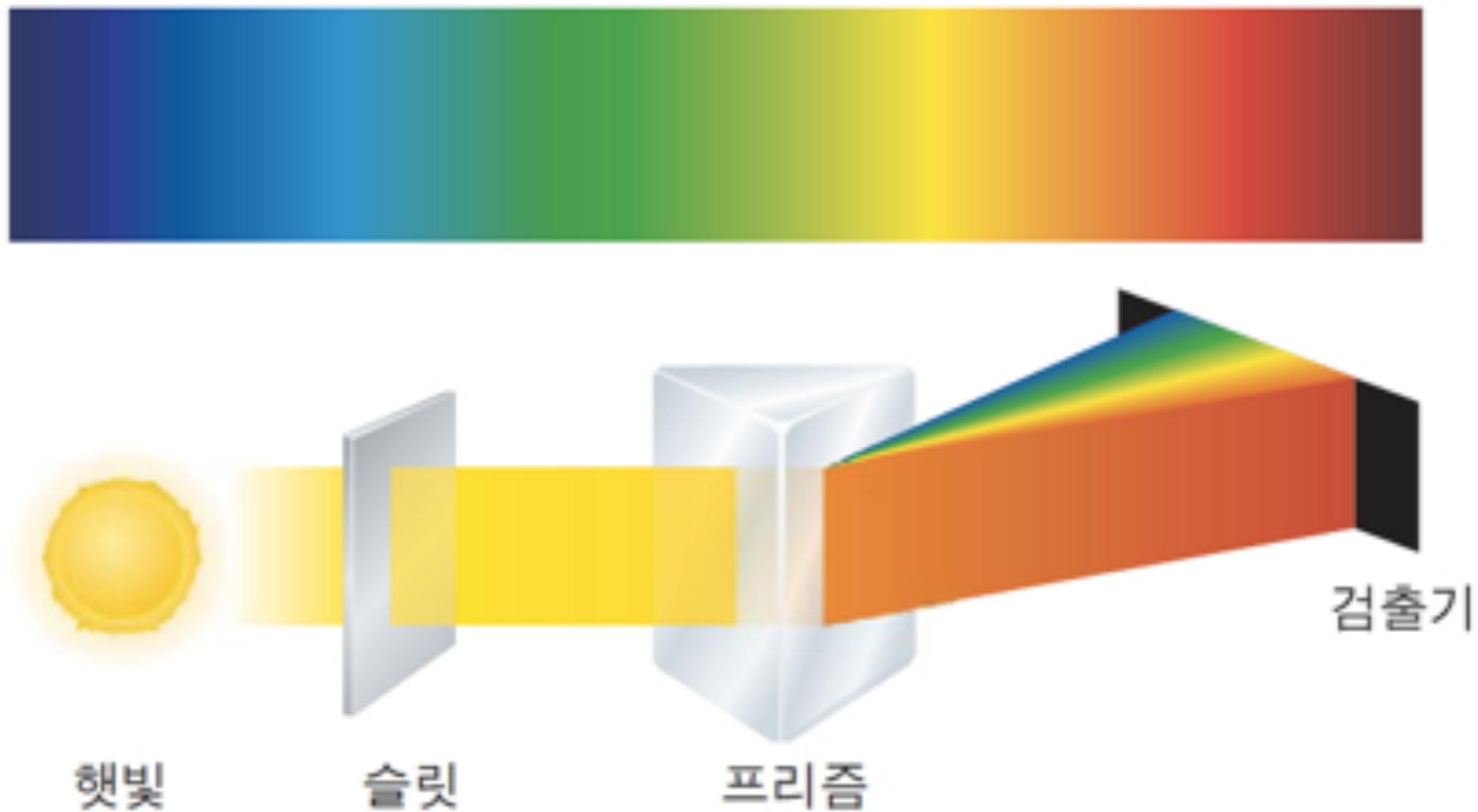
분광학(分光學, spectroscopy)

- 파장(λ)에 따른 빛과 물질 간의 상호작용을 연구
- 프리즘 등을 이용하여 파장 별로 분산된 가시광선을 관찰

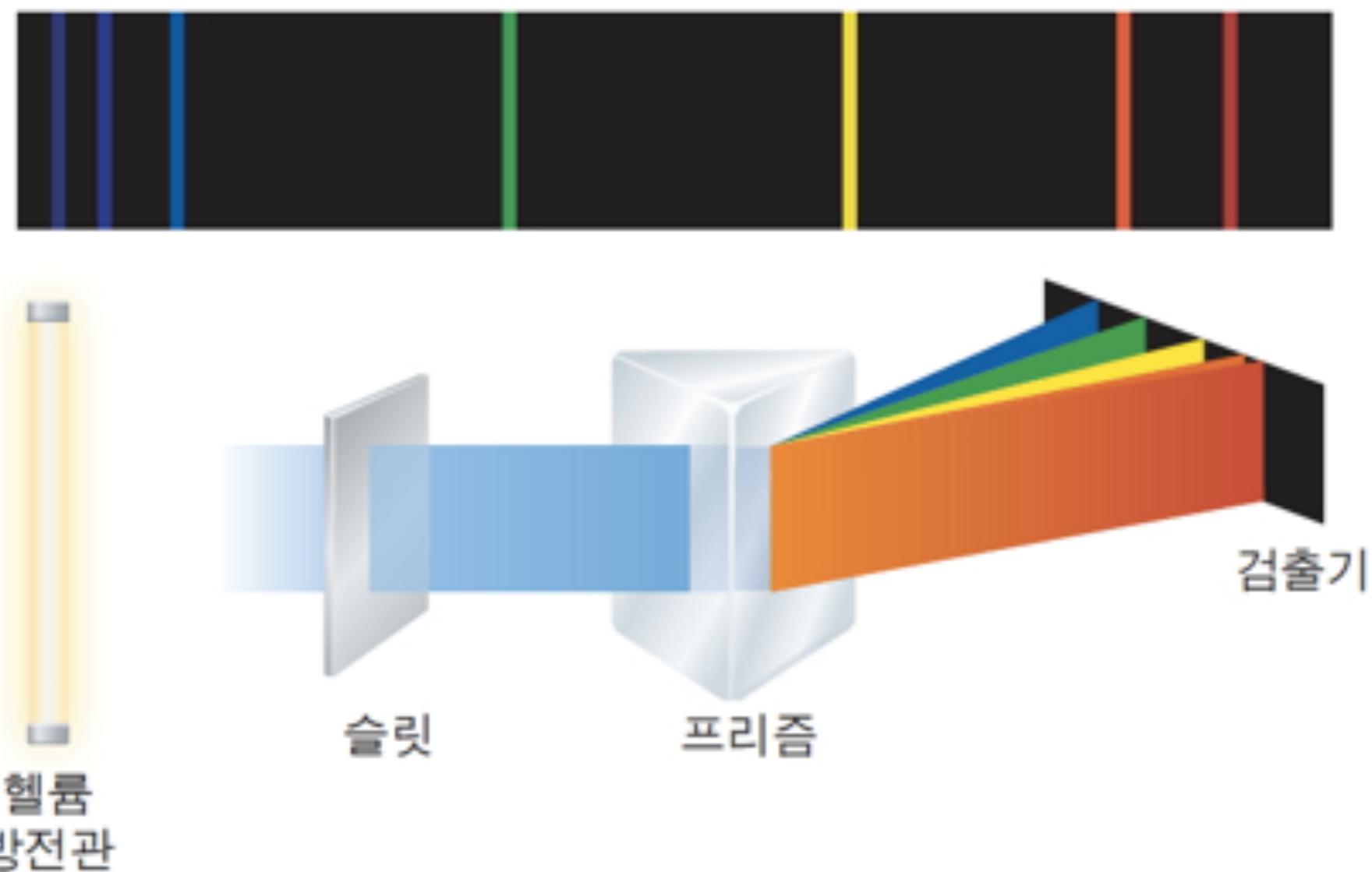


분광학(分光學, spectroscopy)

- 연속 스펙트럼: 고밀도의 뜨거운 물체가 내는 빛의 특징

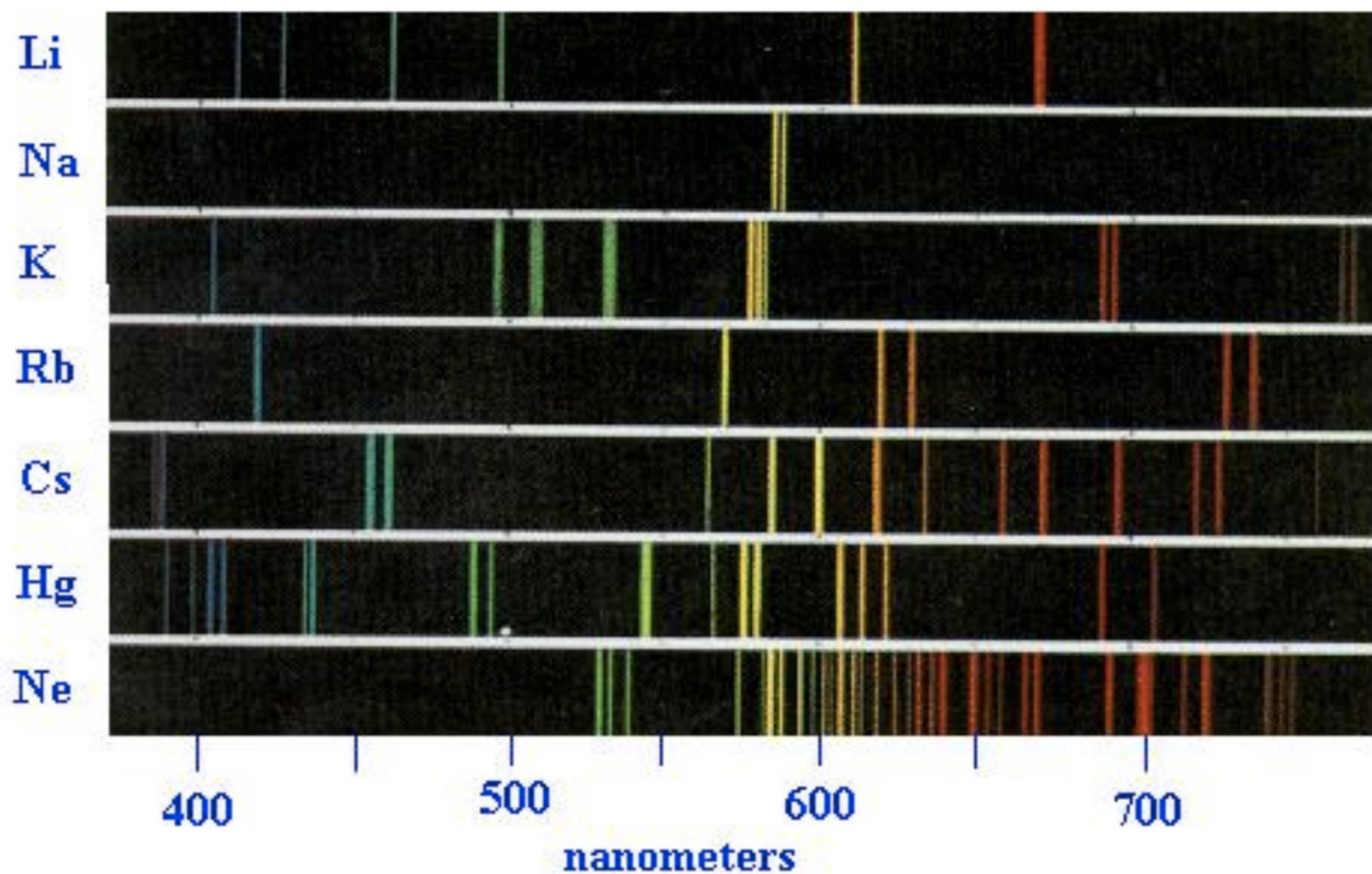


- 밀도가 낮아져서 기체 > 특정한 파장의 빛에서만 나타나는 선-스펙트럼
- 양자역학 > 원자마다 고유한 파장을 나타냄

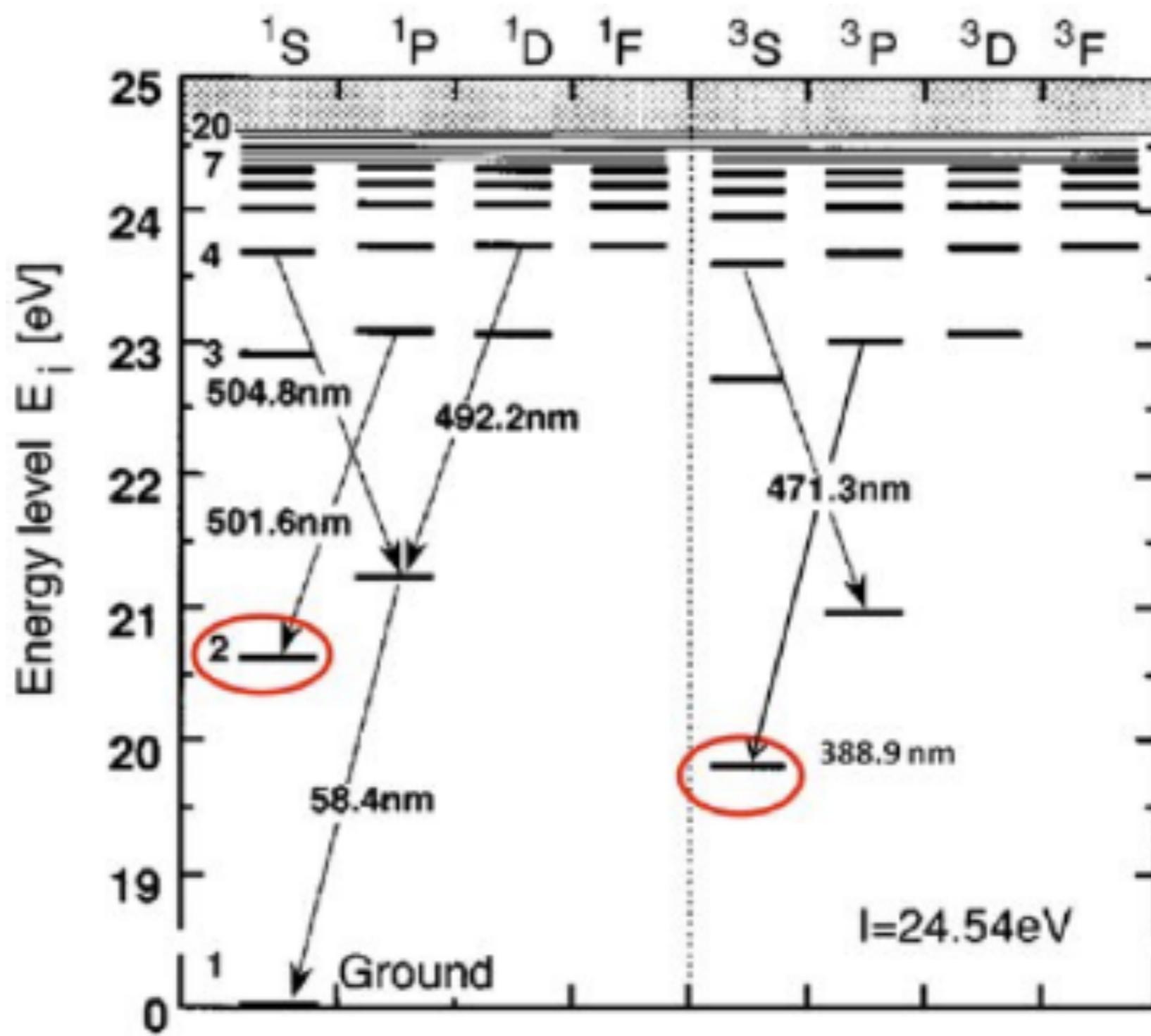


Black Body and Line Spectra

Black Body

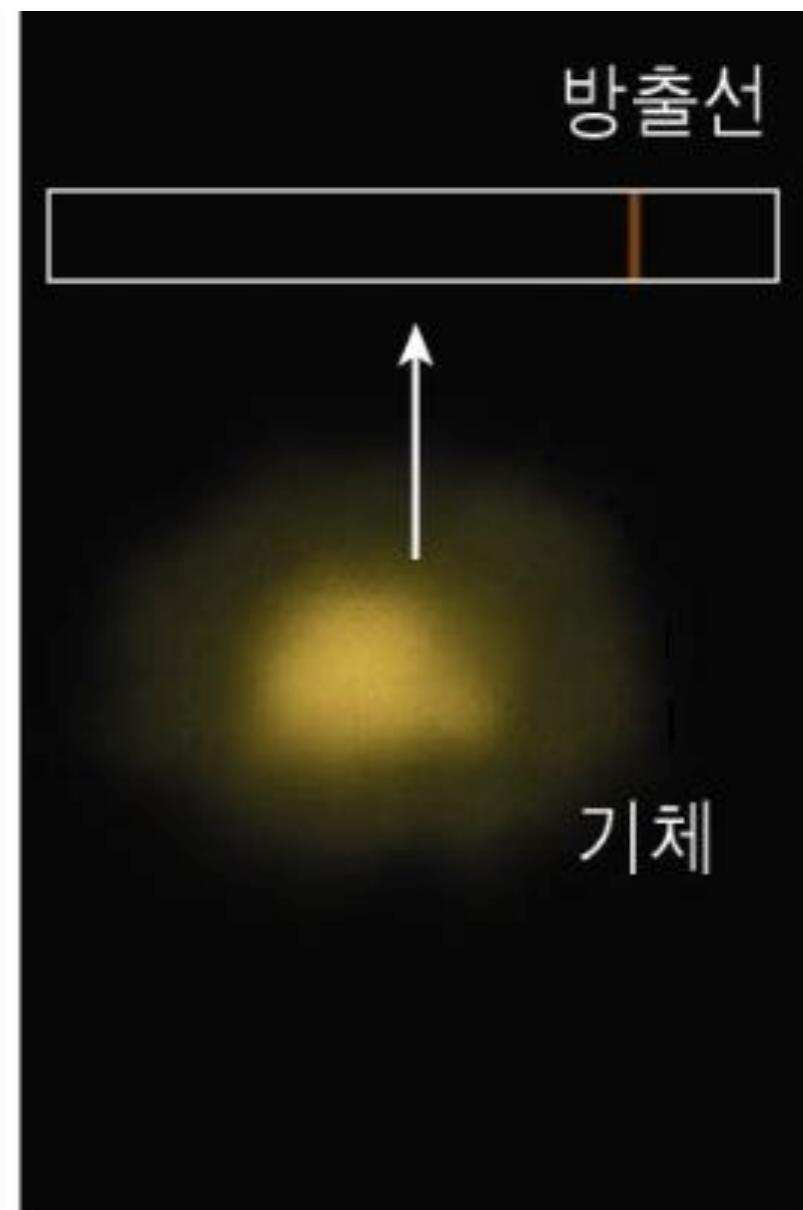
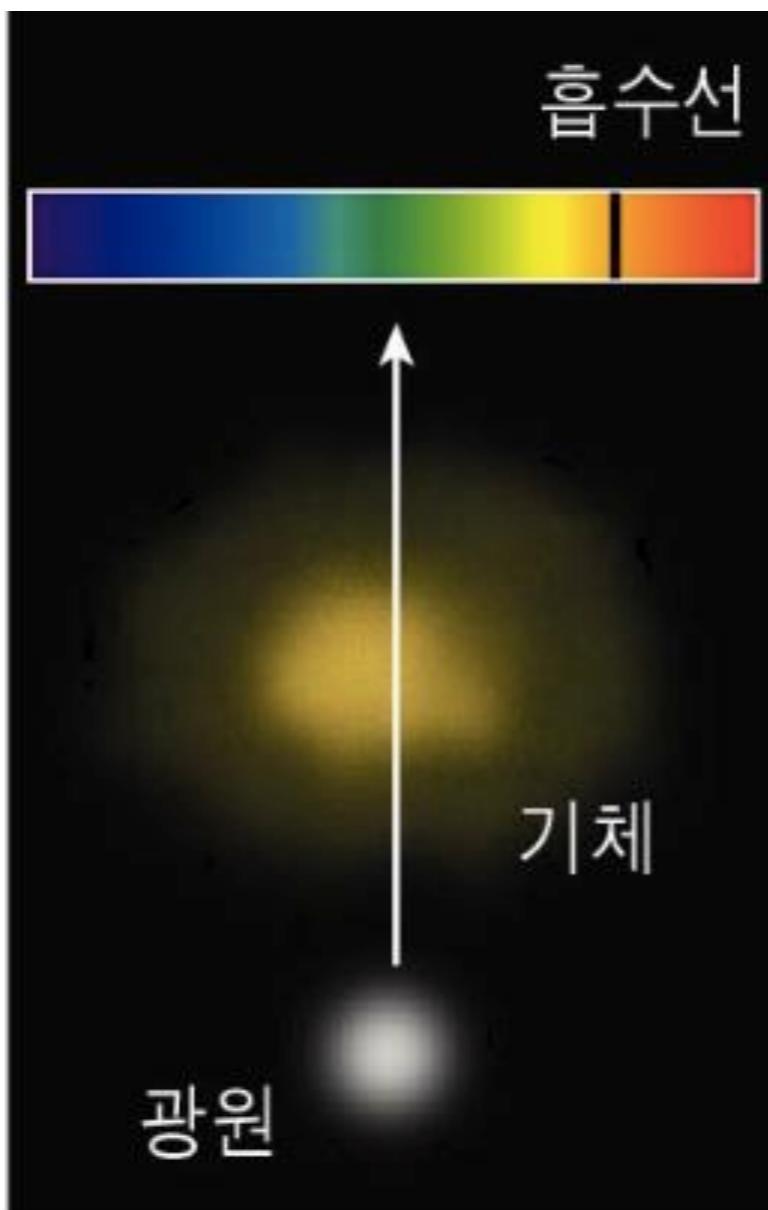
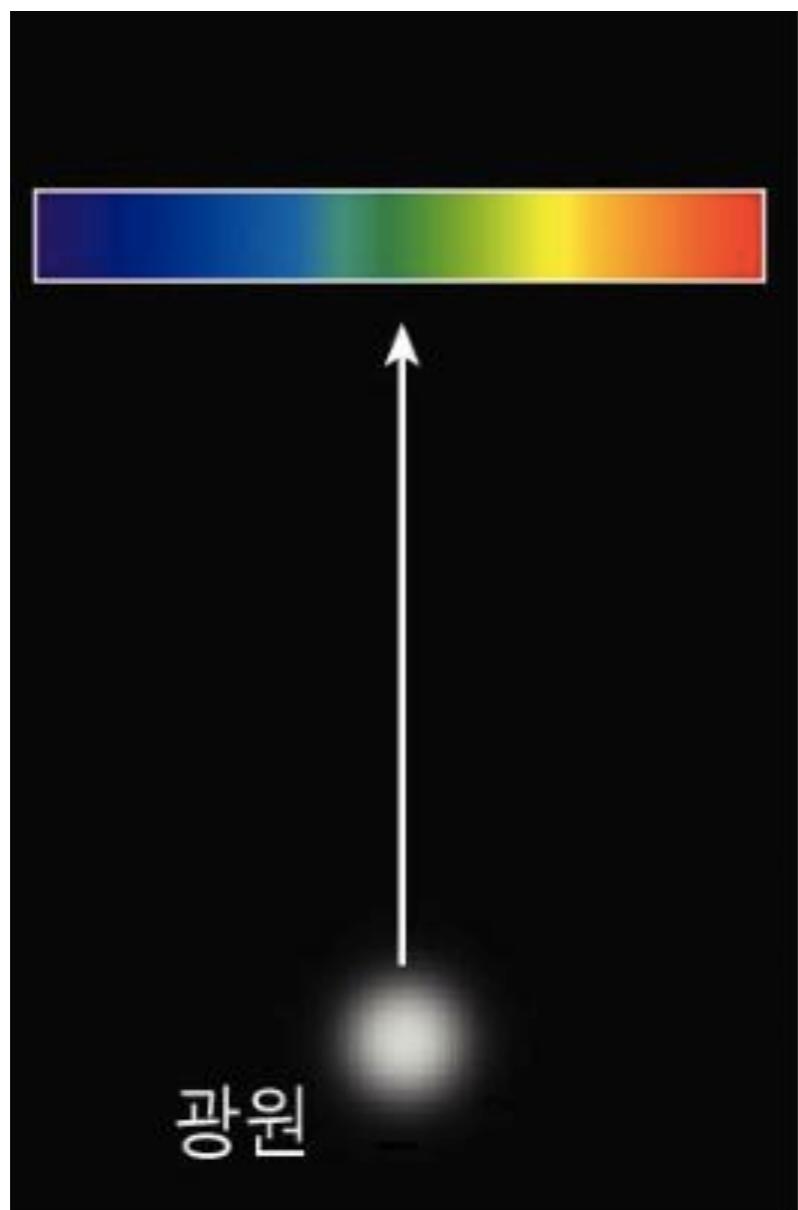


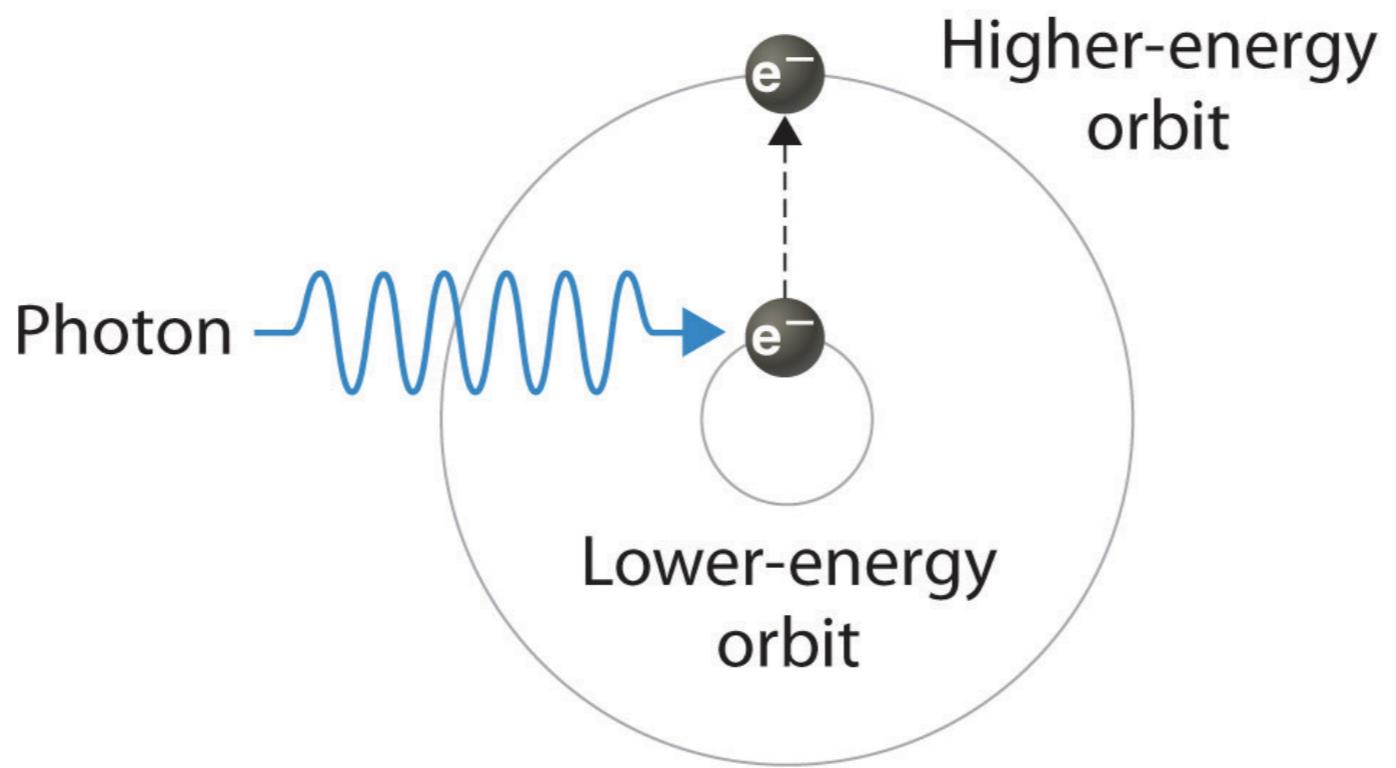
Why?



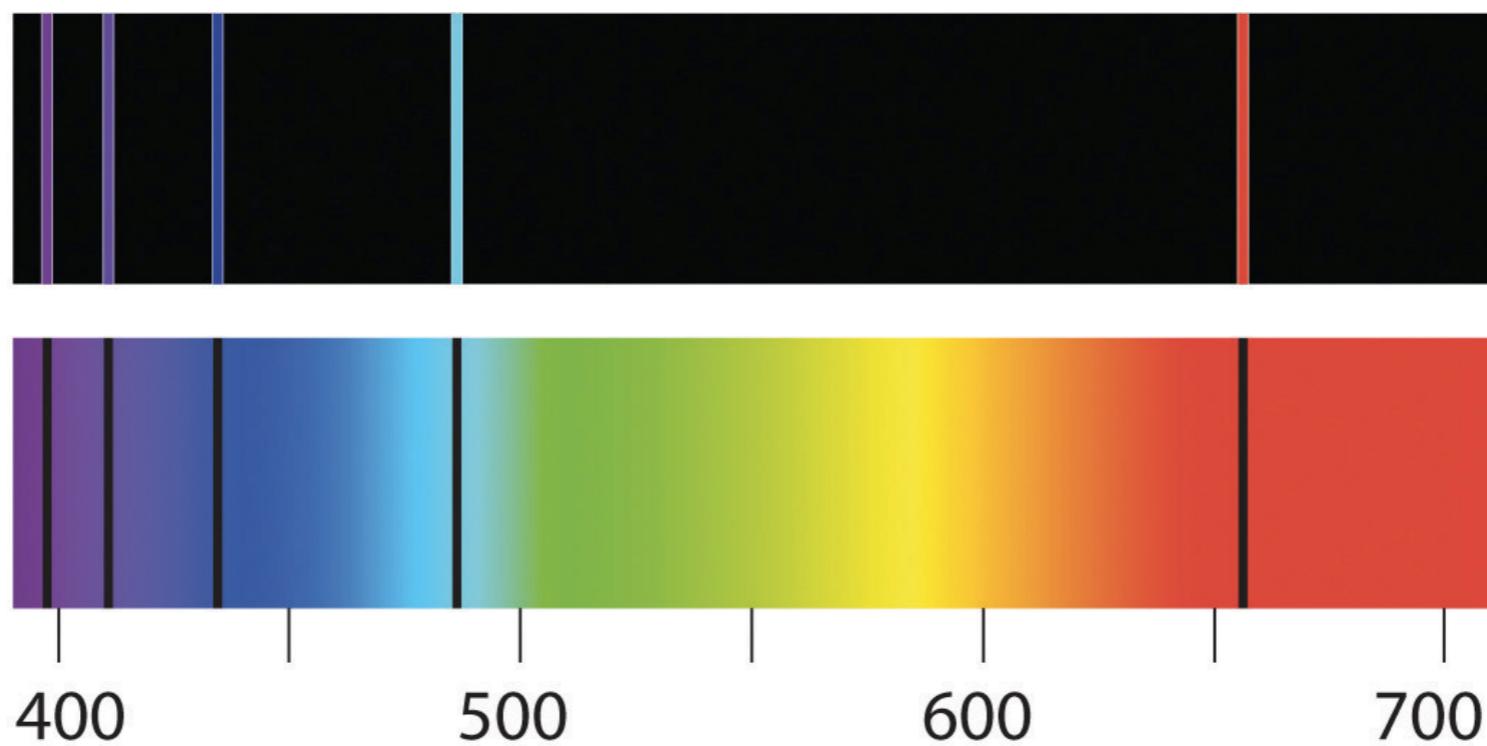
흡수 스펙트럼

- 태양의 연속 스펙트럼 사이 사이에 검은 선
- 원자들이 가열될 때 생기는 선-스펙트럼과 일치
- 태양의 대기에 있는 화학 원소들에 의해 특정 파장의 빛이 흡수-산란





(a) Electronic absorption transition



(b) H_2 emission spectrum (top), H_2 absorption spectrum (bottom)

도플러 효과

- 파원과 관찰자 사이에 상대 운동 있을 때, 관측되는 파동의 진동수가 바뀜
- 진동수 f_0 인 전자기파를 발생하는 파원이 관측자에 대하여 속도 u 로 다가올 때 관측자가 측정하는 전자기파의 진동수

$$f = f_0 \sqrt{\frac{c + u}{c - u}}, \quad \lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{c - u}{c + u}} \quad (\text{Note: } c = \lambda f)$$

도플러 효과

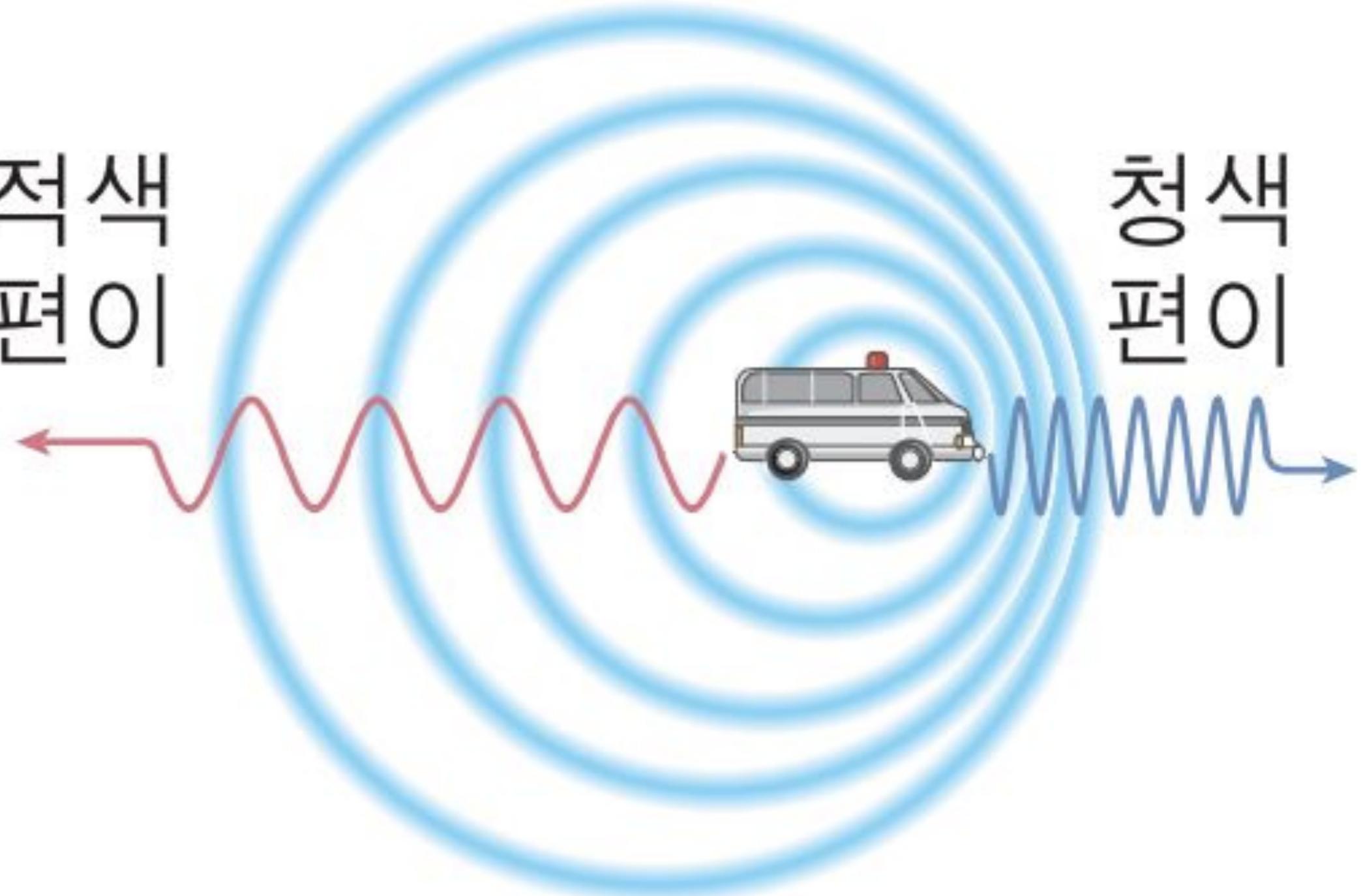
- 파원과 관찰자 사이에 상대 운동 있을 때, 관측되는 파동의 진동수가 바뀜
- 진동수 f_0 인 전자기파를 발생하는 파원이 관측자에 대하여 속도 u 로 다가올 때 관측자가 측정하는 전자기파의 진동수

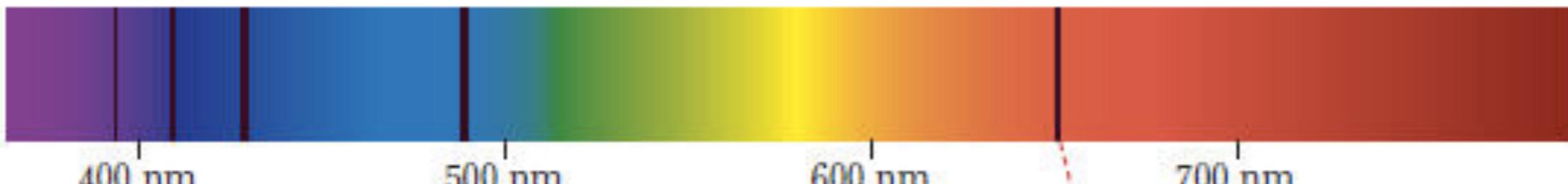
$$f = f_0 \sqrt{\frac{c + u}{c - u}}, \quad \lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{c - u}{c + u}} \quad (\text{Note: } c = \lambda f)$$

- ▶ 접근 ($u > 0$): $\lambda < \lambda_0$ 청색편이
- ▶ 후퇴 ($u < 0$): $\lambda > \lambda_0$ 적색편이

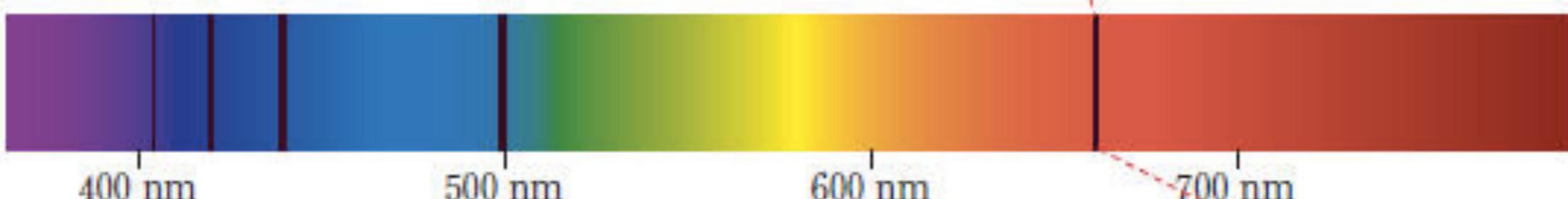
적색
편이

청색
편이

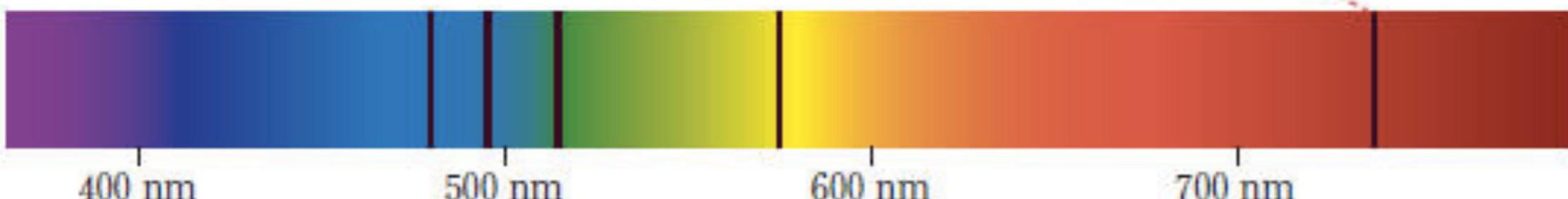




정지 상태의 스펙트럼



약 24,000 km/h의 속도로 후퇴하는 은하의 스펙트럼



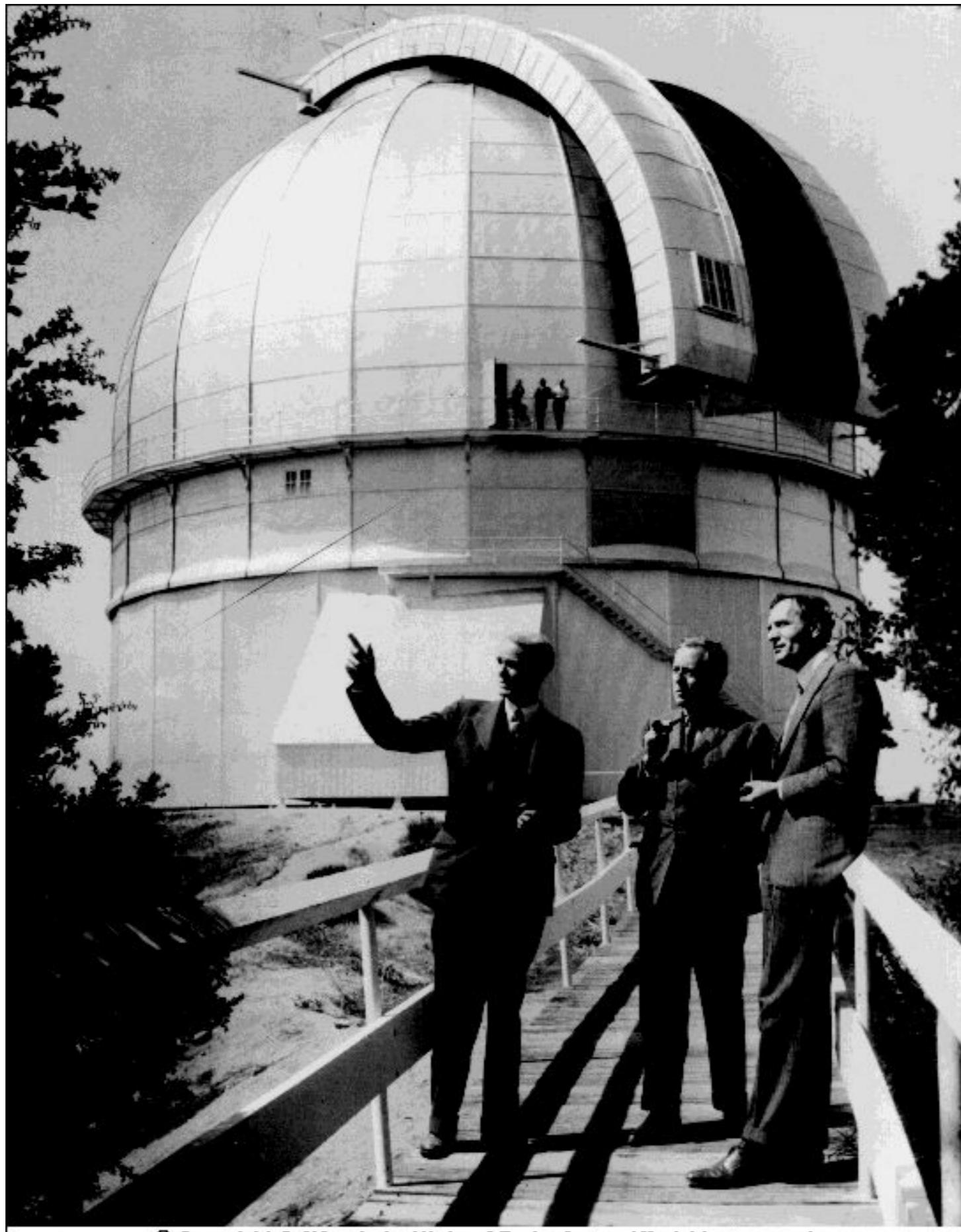
약 13만 5,000 km/h의 속도로 후퇴하는 은하의 스펙트럼

은하의 후퇴 속도에 따른 스펙트럼 비교

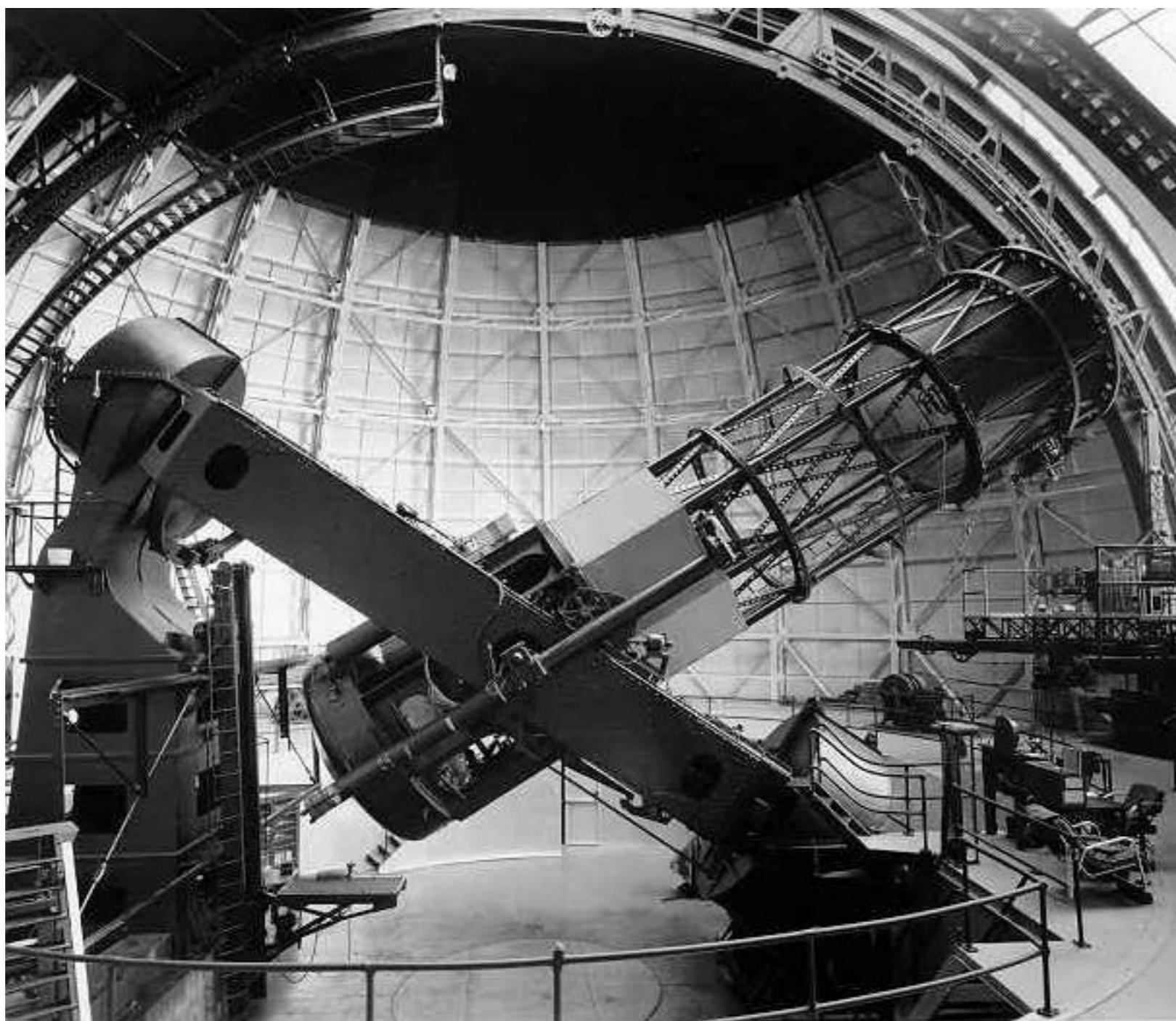
허블의 발견 2: 1929년



- 외부 은하의 적색 편이의 크기가 밝기 거리에 비례
- 윌슨 산의 직경 2.5미터 망원경: 세페이드 변광성들을 통해 구한 나선 은하들의 거리와 적색이동 비교

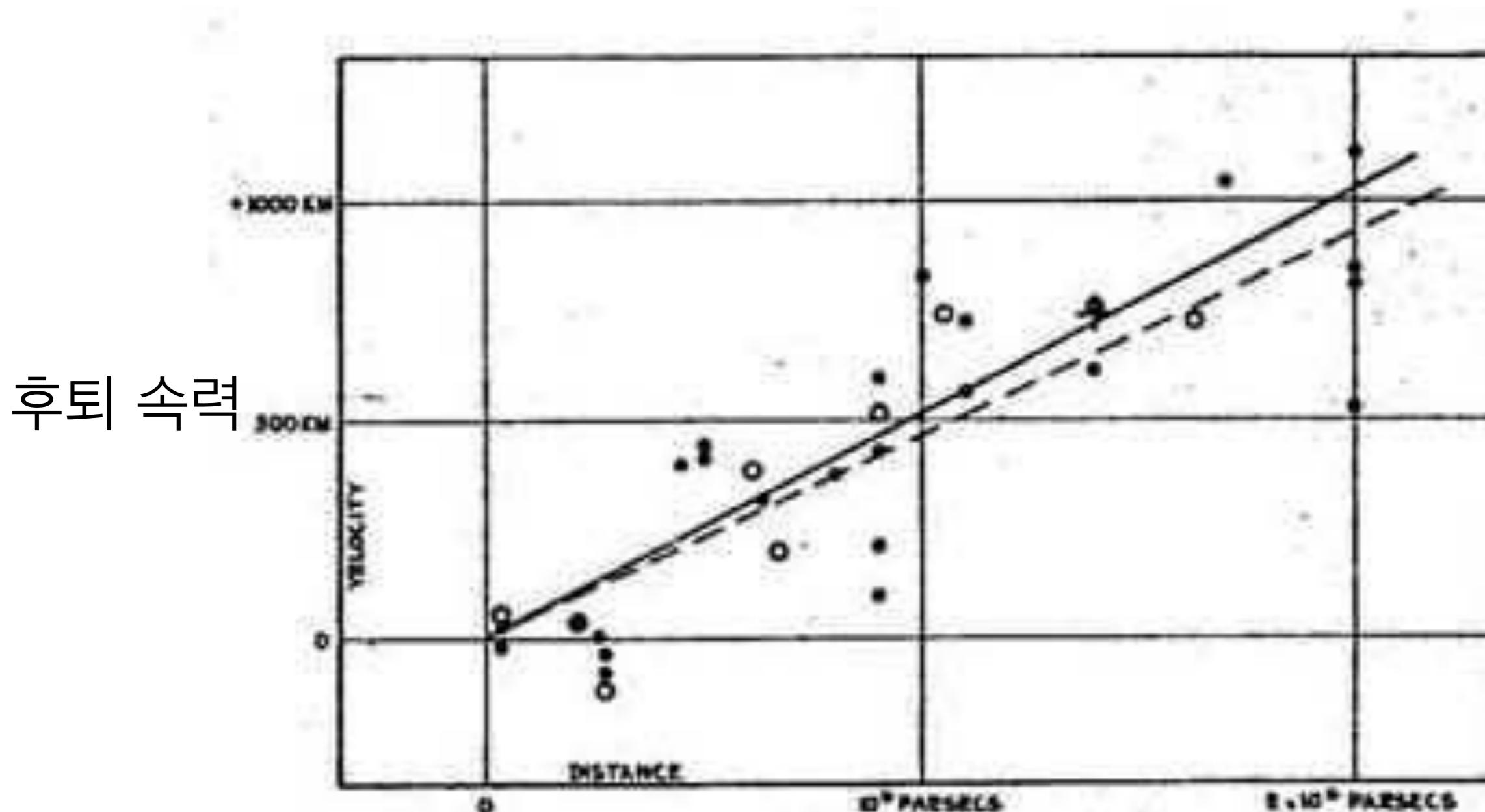


© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.





음의 후퇴 속력: 안드로메다 은하



luminosity distance (밝기 거리)

우리 우주의 공간이 팽창하고 있다

- ▶ 지구에서 측정한 i 번째 은하의 위치를 \vec{r}_i , 속력을 \vec{v}_i 라 하면 허블의 법칙은

$$\vec{v}_i = H_0 \vec{r}_i, \quad H_0 = 73.8 \text{ km/sec/Mpc}$$

1Mpc 떨어진 은하가 서로 멀어지는 속도가
73.8 km/s=265,680km/hr

우리 우주의 공간이 팽창하고 있다

- ▶ 지구에서 측정한 i 번째 은하의 위치를 \vec{r}_i , 속력을 \vec{v}_i 라 하면 허블의 법칙은

$$\vec{v}_i = H_0 \vec{r}_i, \quad H_0 = 73.8 \text{ km/sec/Mpc}$$

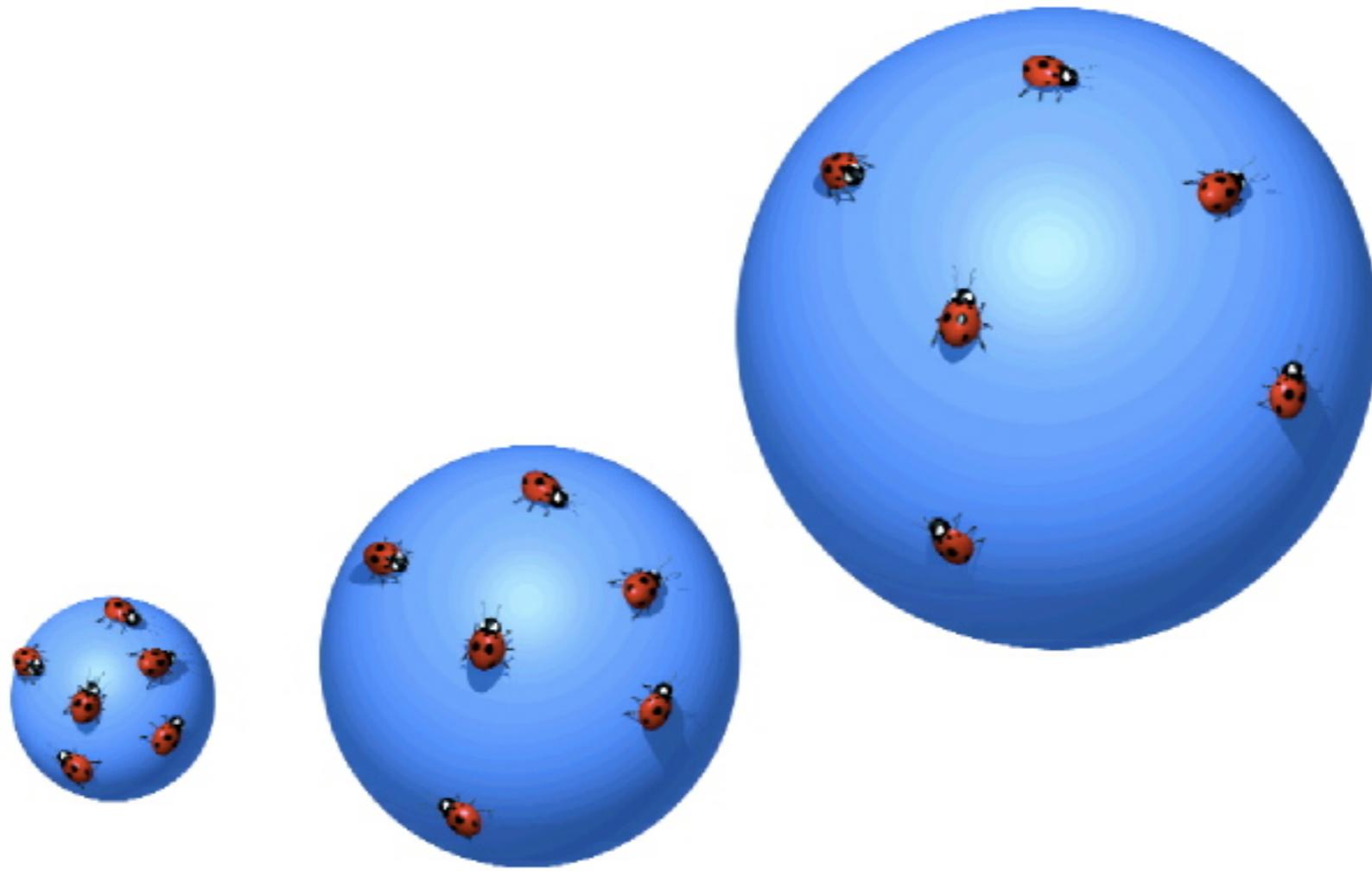
- ▶ 1번째 은하에서 허블 법칙은?

$$\vec{v}_i - \vec{v}_1 = H_0(\vec{r}_i - \vec{r}_1)$$

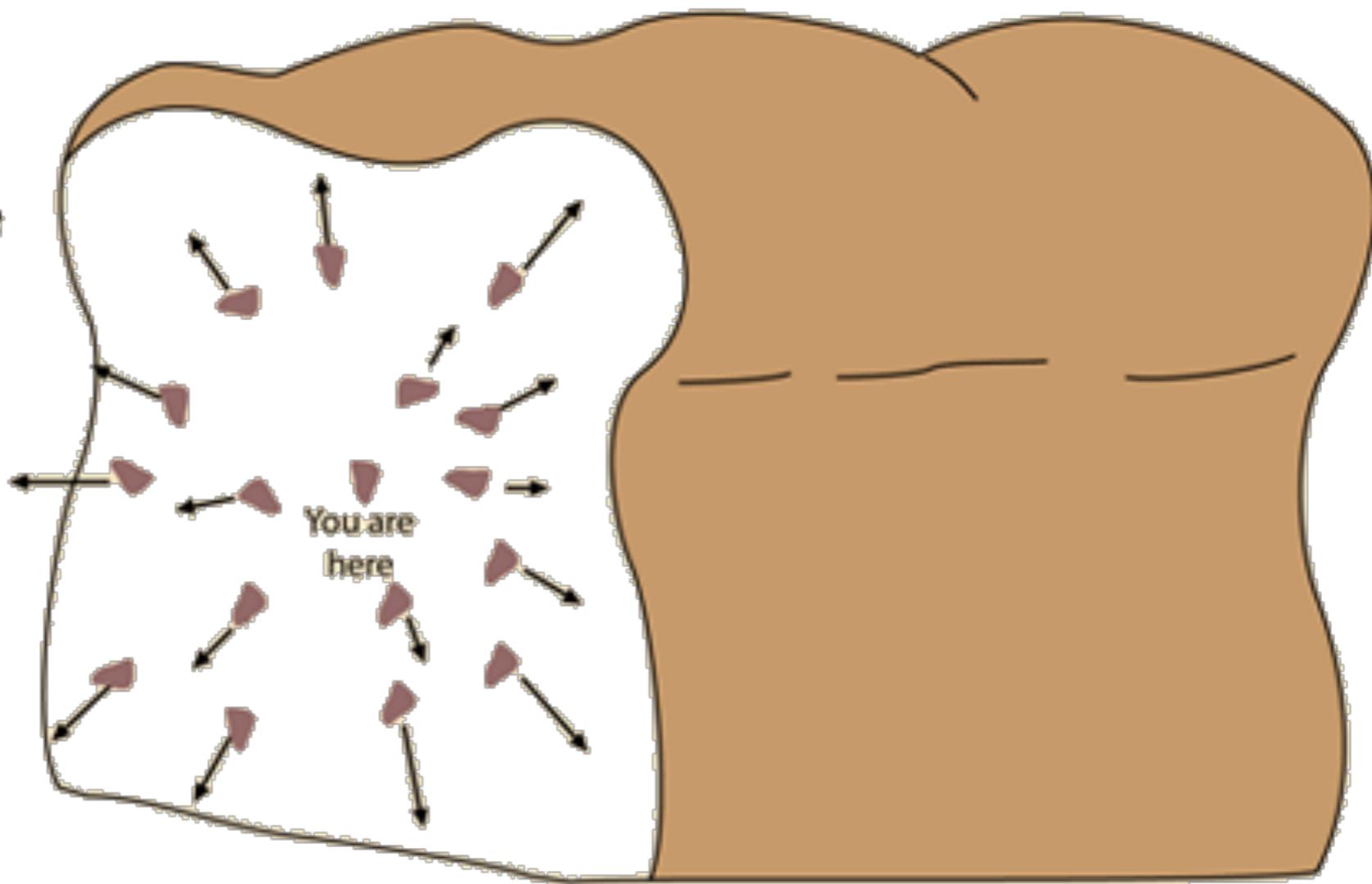
같은 허블 법칙을 관측할 것

$$\vec{v}_i - \vec{v}_1 = H_0(\vec{r}_i - \vec{r}_1)$$

어떤 은하에서 측정해도
모든 은하는 허블 법칙에 따라
멀어진다.



You are sitting on one raisin in the center of a rising loaf of raisin bread. You see every other raisin receding from you, and those further away are receding faster.



우주 공간의 팽창

- 주어진 배경에서 은하가 멀어지는 것이 아니다.
- 은하는 움직이지 않고 정지.
- 은하 사이의 공간이 팽창. 그 공간에 전파해 오는 빛의 파장이 늘어남

온하의 적색편이

