



현대천문학개론

별과우주의 과학 기초

▷ 물리량

별의 물리량 (Observables of Stars)

- 거리 (Distance)
- 광도 (Luminosity), 세기 (Intensity)
- 색깔 (Spectrum)
- 표면온도 (Surface Temperature)
- 크기 (Radii)
- 질량 (Mass)



지어낸 물리량 (총정리?)

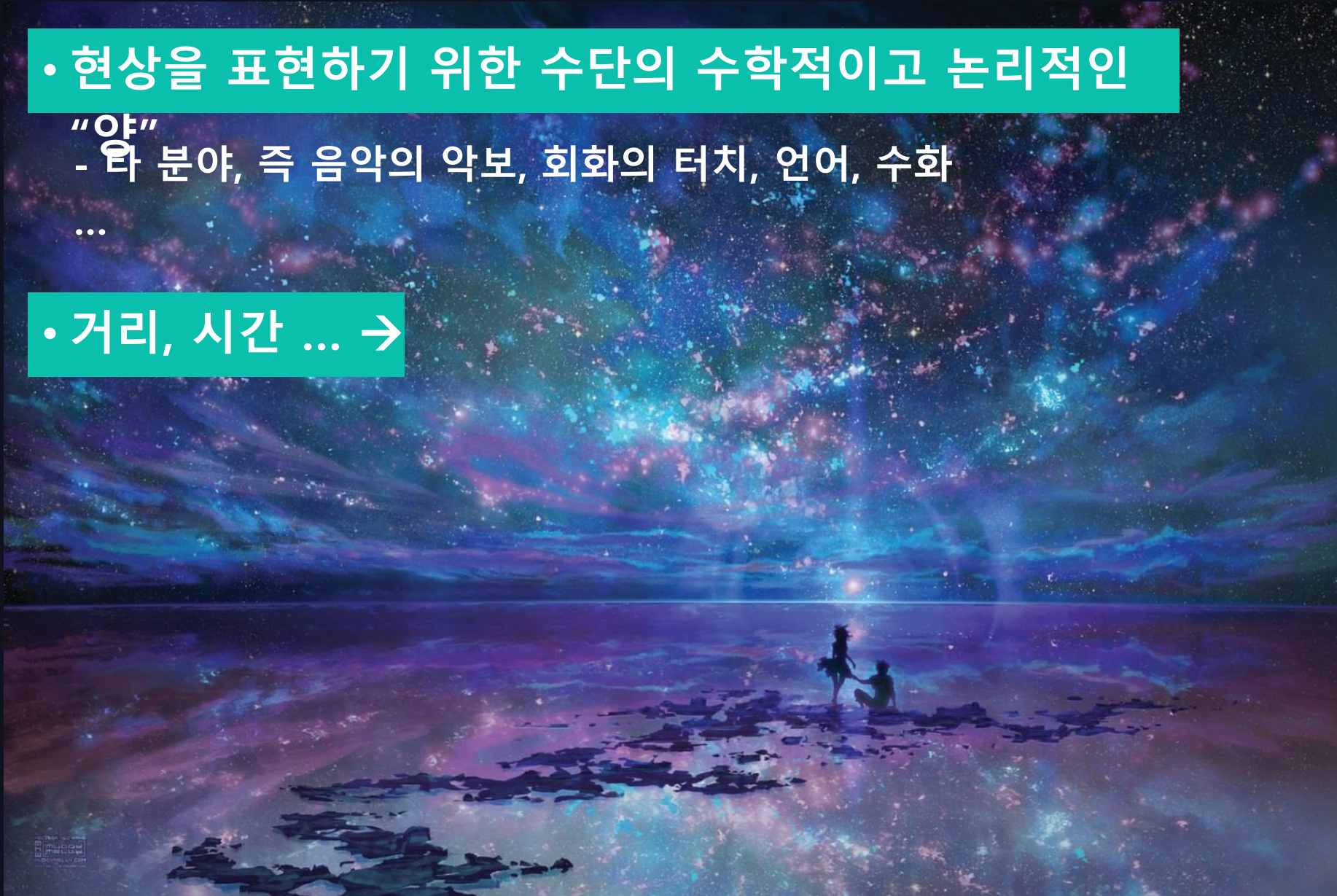
- 현상을 표현하기 위한 수단의 수학적이고 논리적인

“양”

- 타 분야, 즉 음악의 악보, 회화의 터치, 언어, 수화

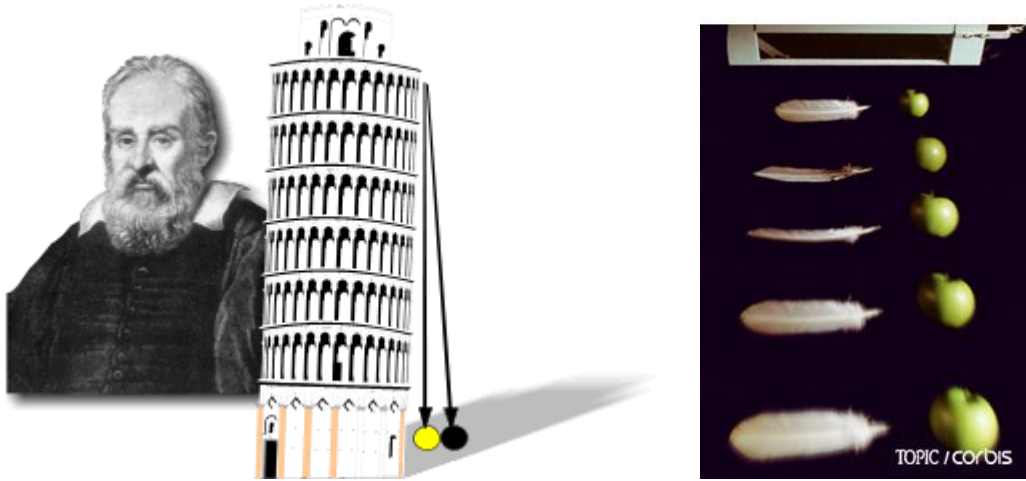
...

- 거리, 시간 ... →



역학적 물리량

» 거리, 시간 ... → 속력, 속도 → 가속도



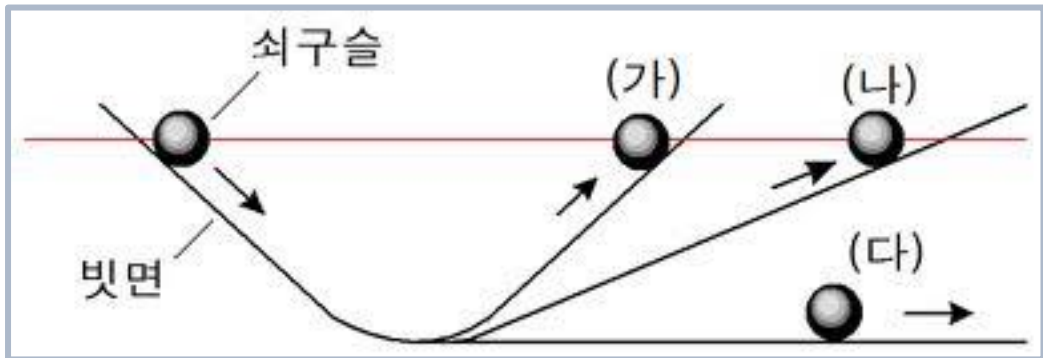
Copernicus 1473 ~ 1543

Galileo 1564 ~ 1642

Newton 1642 ~ 1727

$$F = m \times a$$

$$F = G (m_1 m_2) / R^2$$



뉴턴 법칙

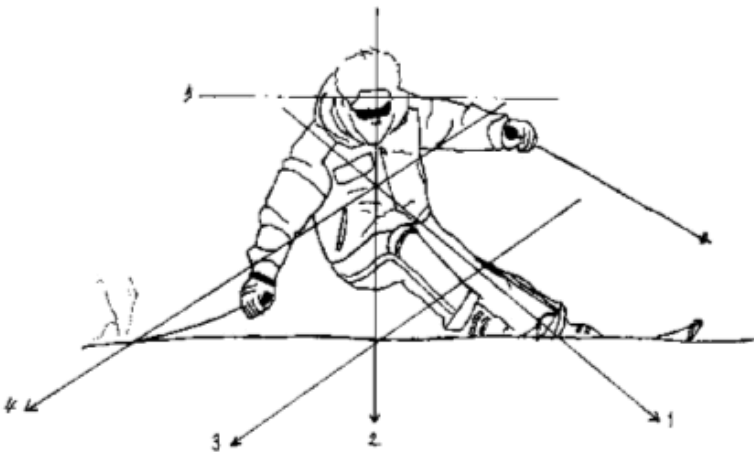
- » 힘 \propto 가속도
→ $F = ma$



- » 원 운동
→ 가속도 운동



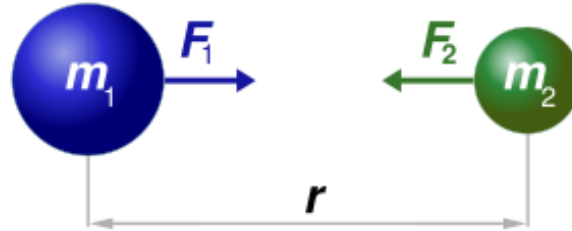
- » 스키어, 자동차의 회전은 어떻게?
천체의 원운동을 만드는 힘은?



역학적 물리량

» 거리, 시간 ... → 속력, 속도
→ 가속도

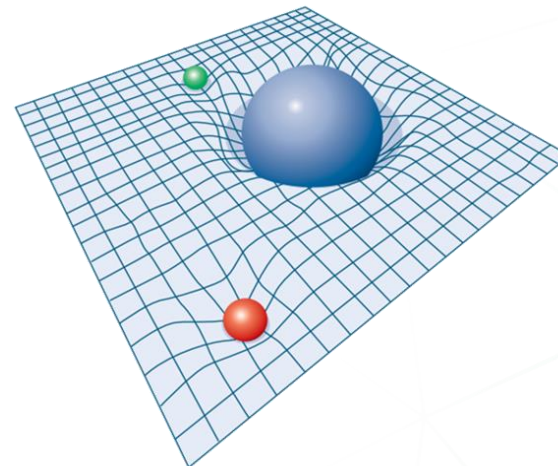
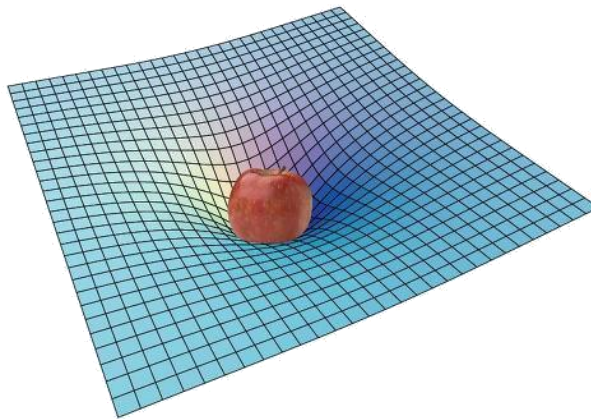
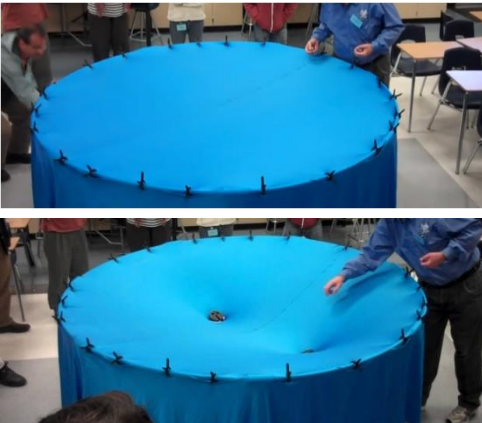
» 가속도 \propto 힘 \leftarrow 중력



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$



» 힘 → 운동량(힘x시간), 에너지(힘x거리)
→ 파워(시간당에너지), 포텐셜(질량또는전하당에너지), 중력장/전기장/자기장
(질량/전하/전류당힘) → 시공간의변형



전자기적 물리량

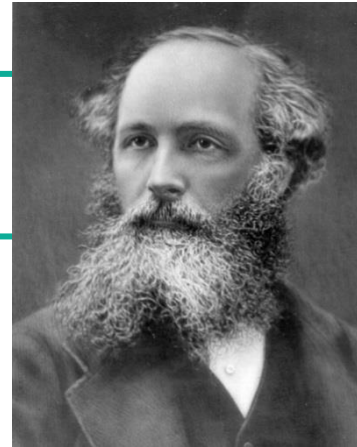
중력 ← 질량, 전기력 ← 전하, 자기력 ← 전류
전기와 자기의 대칭성 → 전자기유도

전자기"파" = 빛

맥스웰 방정식



특수상대론



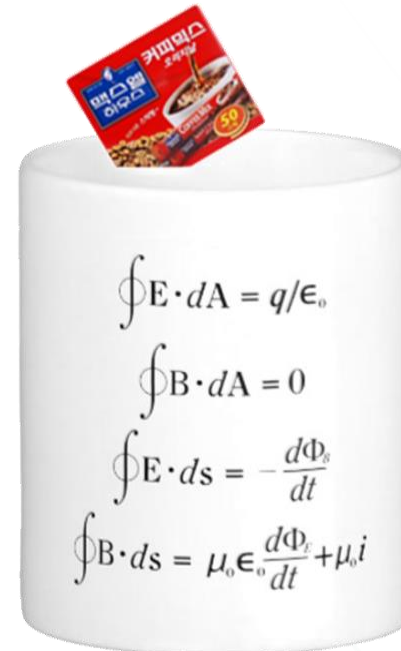
James Clerk Maxwell
(1831 – 1879)

» 전자기 물리량

- 전하
- 전류
- 힘 → 전기장, 자기장, 전자기장
- 에너지 → 전자기퍼텐셜 → 전압
- 파워

» 전기소자

- 저항, 캐패시터, 코일



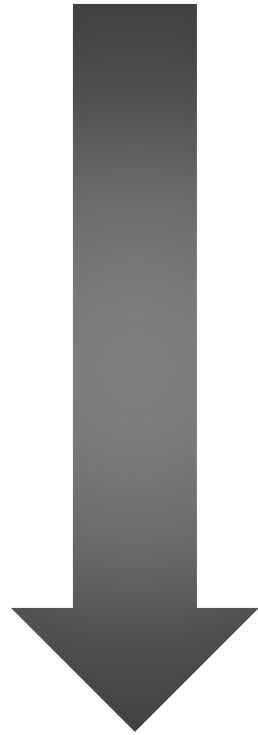
자연의 법칙을 이해하는 근간

뉴턴역학

맥스웰의 전자기학

상대론

양자론



Theory of Everything



거리의 단위

» 인치: 손가락 마디 사이의 거리

» 야드: 영국왕의 집게손가락에서 코까지의 거리

» 미터법

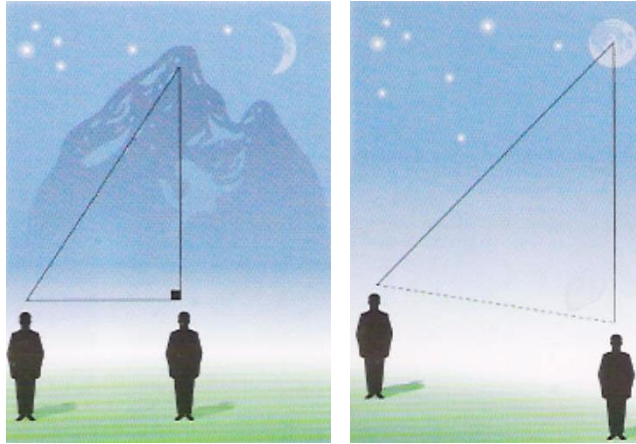
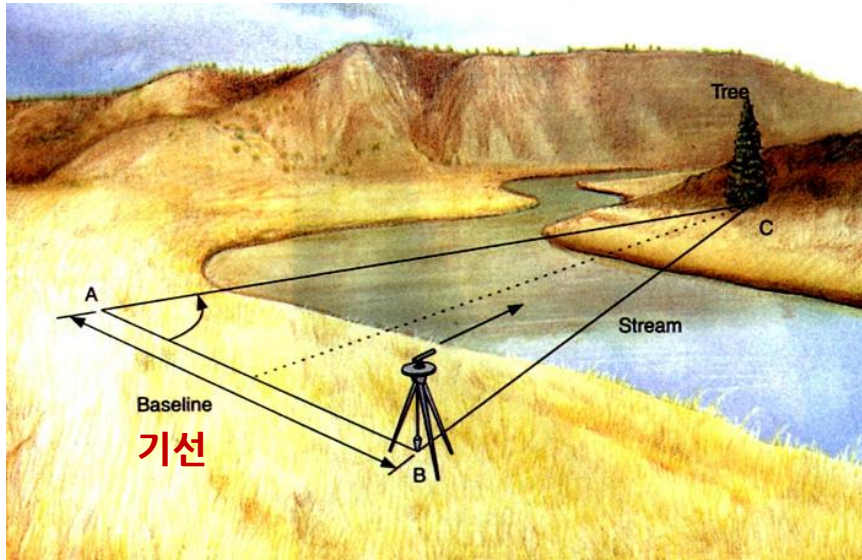
- 프랑스 1799년 제정
- 지구의 한쪽 끝에서 적도까지의 거리의 천만분의 일
- 1889년 플레티늄-이리듐 금속 막대
- 1960년 크립톤86의 특별한 원자천이선 파장의 1,650763.73배
- 1983년 세슘133 원자시계 진동수의 9,192,631,770배
- 진공에서 빛이 1/299,792,456.8초 달린 거리
- 1광초(LS) = 299,792,458.6 m

» 태양계 안에서의 거리

- 전파 레이더로써 행성간의 거리 측정
- AU(천문단위): 지구와 태양사이의 평균거리
- 1 AU = 149,597,892,000 m ($\sim 1.5 \times 10^{11}$ m) = 499.004854 광초 ~ 8광분



삼각측량법



- » 긴 기선과 정밀한 각도측정 -> 시차
- » 프톨레미는 지구를 기선으로 하여 달까지의 거리를 수 % 정확도로 측정
- » 지구 직경을 기선으로 하여 행성간의 거리 측정할 수 있다
- » 지구 공전을 이용하여 가까운 별의 거리를 측정할 수 있다
 - 2 AU (3억km)의 기선을 제공
 - 그리스 때의 아리스타르쿠스학파와 아리스토텔레스학파와의 논쟁 (이전 강의 참조)
 - 1초 (1/3600도): 동전을 5km에서 보는 각. 얼굴을 50km에서 보는 각

별의 시차 측정

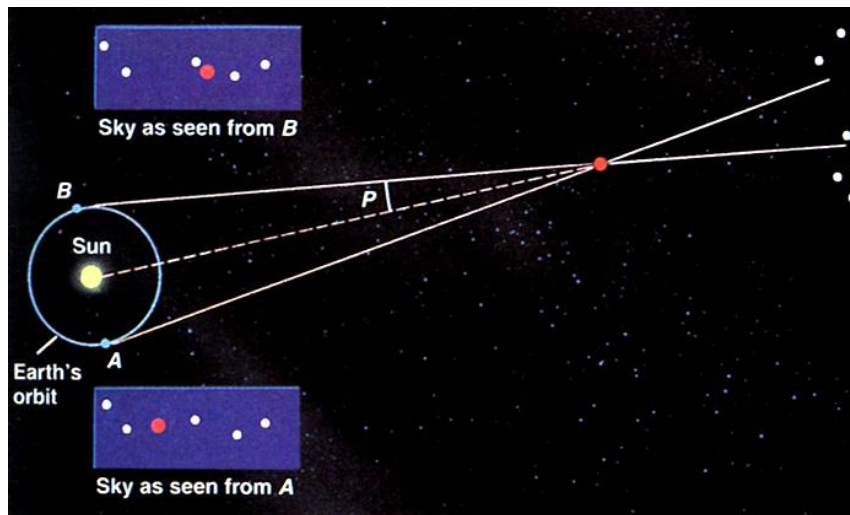
- » 1838년 프레드리히 베셀, 토마스 쉰더슨, 프리드리히 스트루베 독립적으로 알파 센타우루스, 61 시그너스, 베가 측정
- » 알파 센타우루스: 1.5초의 시차, 가장 가까운 별 → 4.4광년
- » 망원경없이 보는 가장 밝게 보이는 별: 시리우스 → 8광년
- » 1초: 기선이 1AU일 때 거리가 206,265 AU (31조 km)
- » 시차: 그림에서 P



프레드리히 베셀

- » **시차(parallax)가 1초(second)되는 거리 → parsec (pc)**

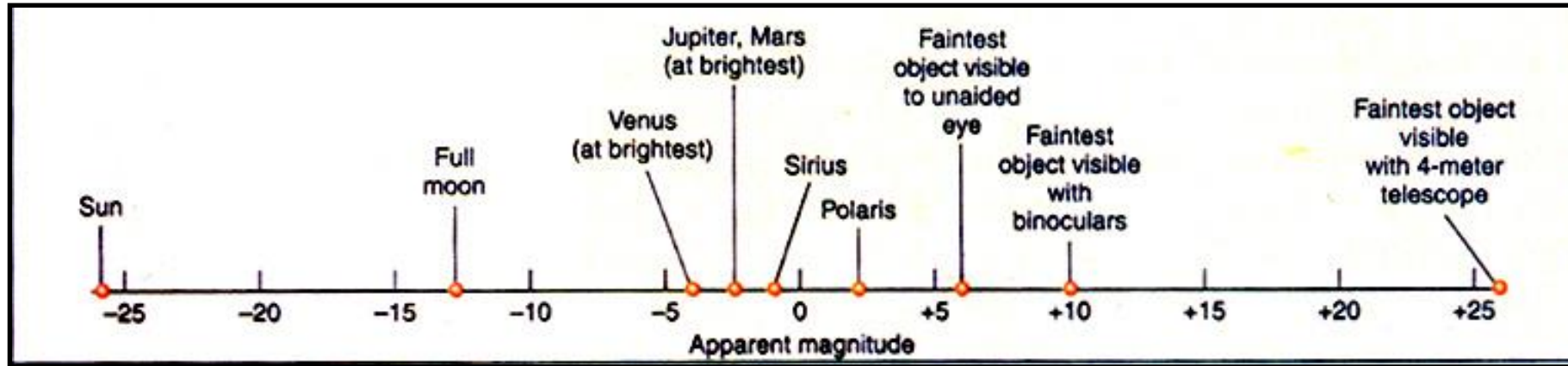
- $R = 1 / P$
- $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ LY} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$
- $1 \text{ LY} = 0.31 \text{ pc}$
- 지상망원경의 한계: ~0.1초.
그러나 10% 오차내에서는 0.05초(20pc)
- 우주에서의 측정은 0.003초
(300pc, 약 1000광년, 우리은하의 1/100)까지 가능



별들의 밝기

» 밝기의 등급

- 기원전 150년경 히파르쿠스, 850개의 별의 분류
- 1등급에서 6등급 (육안식별), 차이는 100배
- **1등급이 차이는 2.512배** (즉, 5등급과 6등급이 차이는 약 2.5배이다)



밝기와 거리

» 겉보기밝기와 절대밝기

- 별의 절대등급 \propto 별의 원래밝기 \propto 광도
- 절대밝기의 정의: 거리가 10 pc에 있을 때의 밝기

» flux의 역제곱법칙

- f(임의의 거리) : F(10pc 거리) = D^2 (10pc) : d^2
 $\rightarrow \log f : \log F = 2\log D : 2\log d \rightarrow \log f/F = -2 \log d/D$

» Hipparchos Magnitude, Apparent Magnitude:

$$m_1 - m_2 = -5/2 \log f_1/f_2 \text{ 에서}$$

$$m - M = 5 \log d/10 \text{ (pc)} \rightarrow \text{거리지수(distance modulus)}$$

» 태양의 절대밝기 = 4.72, 겉보기밝기 = -26.82 \rightarrow 태양까지의 거리는?

$$M_{\odot} = 4.72$$

Luminosity, Flux, Intensity

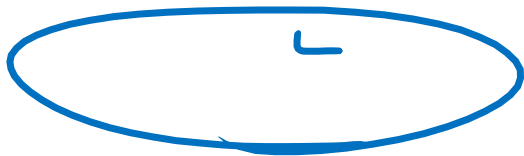
- » Luminosity: Power radiated by a source of radiation in Watt or J/s : 시간당
- » Flux: number/time/area: 시간당 면적당
- » Intensity or Brightness: 시간당 면적당 입체각당

Luminosity : power (J/s = W) → 시간당 에너지

$$L = L_\nu d\nu = 4\pi R_s^2 \int_0^\infty F_\nu d\nu \quad \text{at stellar}$$

Flux :

시간당, 면적당



$$\begin{aligned} \Rightarrow L_\odot &= 3.86 \times 10^{26} \text{ W} \\ 1 \text{ AU} &= 1.50 \times 10^{11} \text{ m} \\ \therefore f_\odot &= 1.36 \text{ kW/m}^2 \\ (F_\odot &= 63 \text{ mW/m}^2) \end{aligned}$$

Intensity :

(Brightness)

시간당, 면적당, 입체각당

은하에는 태양과 같은 별이 몇 개?

» 질량 계산


1. Add up light by assuming “mass-to-light” ratio
2. Measure orbits using Kepler’s law, $v^2 = GM/a$

은하에는 태양과 같은 별이 몇 개?

» 질량 계산

1. Add up light by assuming "mass-to-light" ratio

$$\textcircled{1} \quad m - M = 5 \log \frac{D}{10 \text{ pc}}$$

ex) Virgo cluster
14 mag 
20 kpc
20 Mpc

$$\begin{aligned} 14 - M &= 5 \log \left(\frac{20 \text{ Mpc}}{10 \text{ pc}} \right) \\ &= 5 \log 10^6 + \log 2 = 0.3 \\ &= 31.5 \\ M &= -17.5 \end{aligned}$$

$$\textcircled{2} \quad M_1 - M_2 = -\frac{5}{2} \log \frac{b_1}{b_2}$$

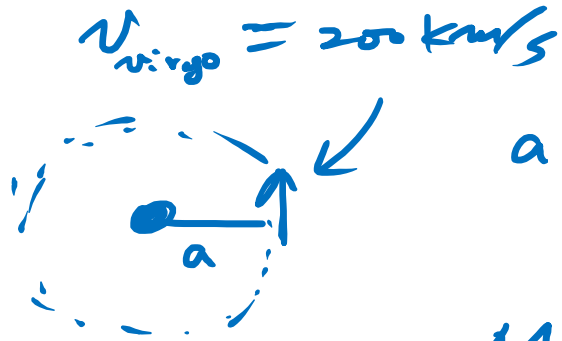
$$\begin{aligned} 10^{-\frac{2}{5}(M_1 - M_2)} &= \frac{b_1}{b_2} \Rightarrow 10^{\frac{2}{5} \cdot 22.5} = 10^9 = \frac{b_{\text{Virgo}}}{b_{\text{sun}}} \\ &\quad \uparrow \quad \uparrow \\ &\quad -17.5 \quad +5 \end{aligned}$$

$(M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg})$
 $\approx 10^{10} M_{\odot}$

은하에는 태양과 같은 별이 몇 개?

» 질량 계산

2. Measure orbits using Kepler's law, $v^2 = GM/a$



$$v_{\text{virgo}} = 200 \text{ km/s}$$

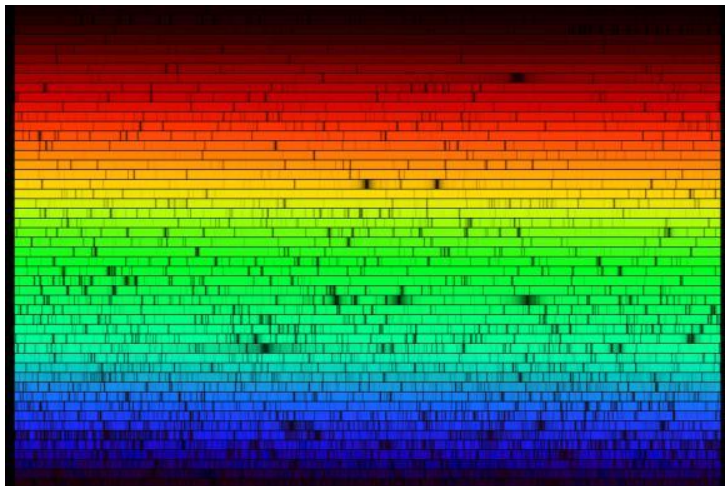
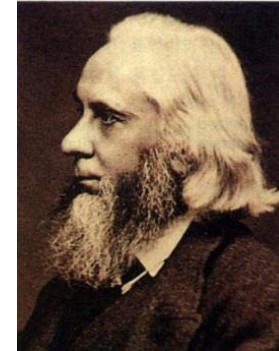
$$a \sim 20 \text{ kpc} = 2 \times 10^4 \times 3 \times 3 \times 10^8 \times 3 \times 10^7 \\ = 6 \times 10^{20} \text{ m}$$

$$M_{\text{virgo}} = \frac{v^2 a}{G} = \frac{(2 \times 10^5)^2 \cdot 6 \times 10^{20}}{7 \times 10^{-11}} \\ = 4 \times 10^{41} \text{ kg} \\ = \underline{\underline{2 \times 10^{11} M_{\odot}}}$$

별의 스펙트럼



- » 빛을 스펙트럼으로 분광
- » 1823년 프라운호퍼(Joseph von Fraunhofer)
 - 별 스펙트럼에서 연속적인 색깔영역에 검은선의 발견
- » 1864년 허긴스 경(William Huggins)
 - 별 스펙트럼의 방출선이 지구의 원소들의 스펙트럼과 비슷
 - 태양계의 원소들이 별들에도 존재
- » 별은 주로 수소로 이루어져 있다

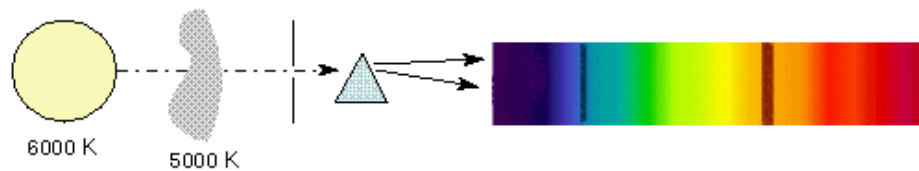
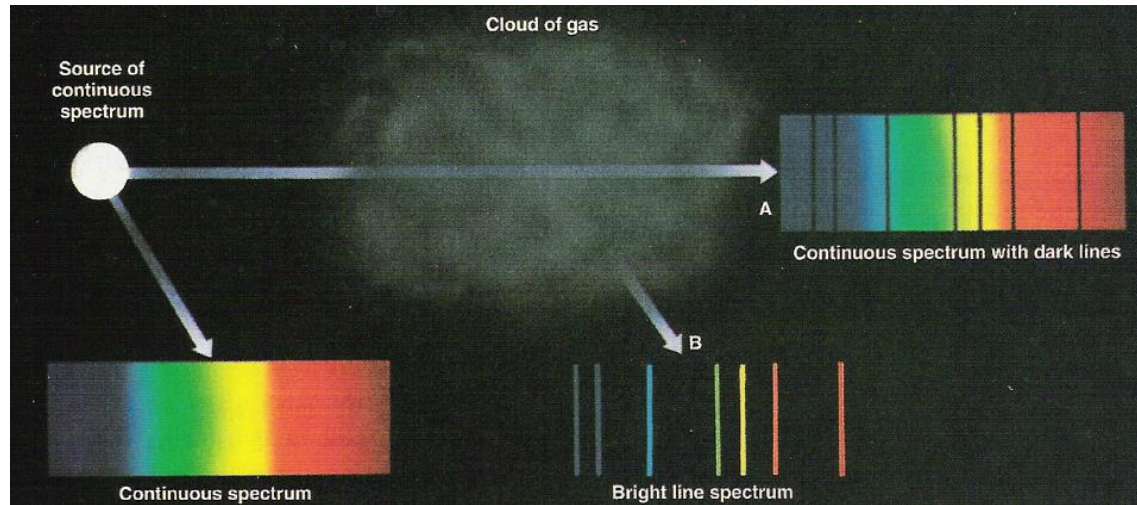


Solar Spectrum - visible light

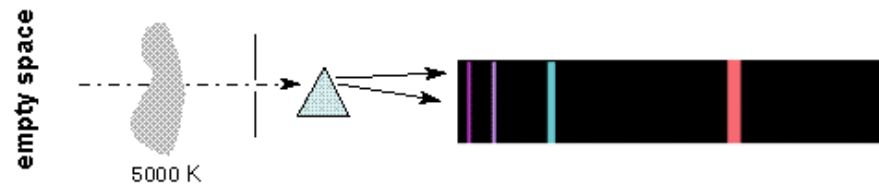
This absorption happens in the Sun's own atmosphere, so these lines correspond to which elements are present in the Sun.

스펙트럼의 관측

- » 연속스펙트럼
- » 흡수스펙트럼
- » 방출스펙트럼



Type of spectrum seen depends on the temperature of the thin gas **relative to** the background. TOP: thin gas is *cooler* so **absorption lines** are seen. BOTTOM: thin gas is *hotter* so **emission lines** are seen.



스펙트럼 계열과 온도의 계열

스펙트럼선의 세기 \leftrightarrow 들뜸-이온화온도

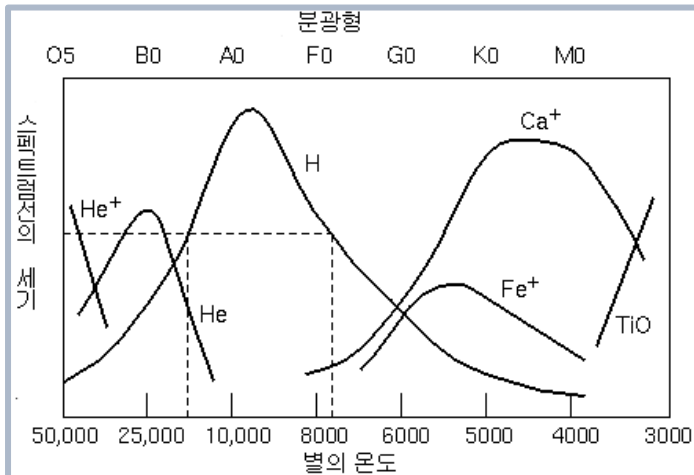
분광형과 표면온도

O형 - B형 - A형 - F형 - G형 - K형 - M형

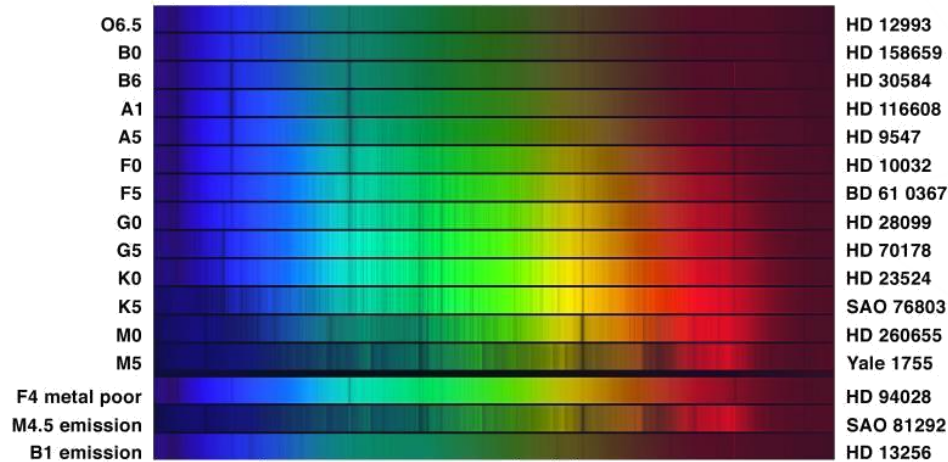


청색 청백색 백색 담황색 황색 주황색 적색

높다 \leftarrow 표면온도 \rightarrow 낮다



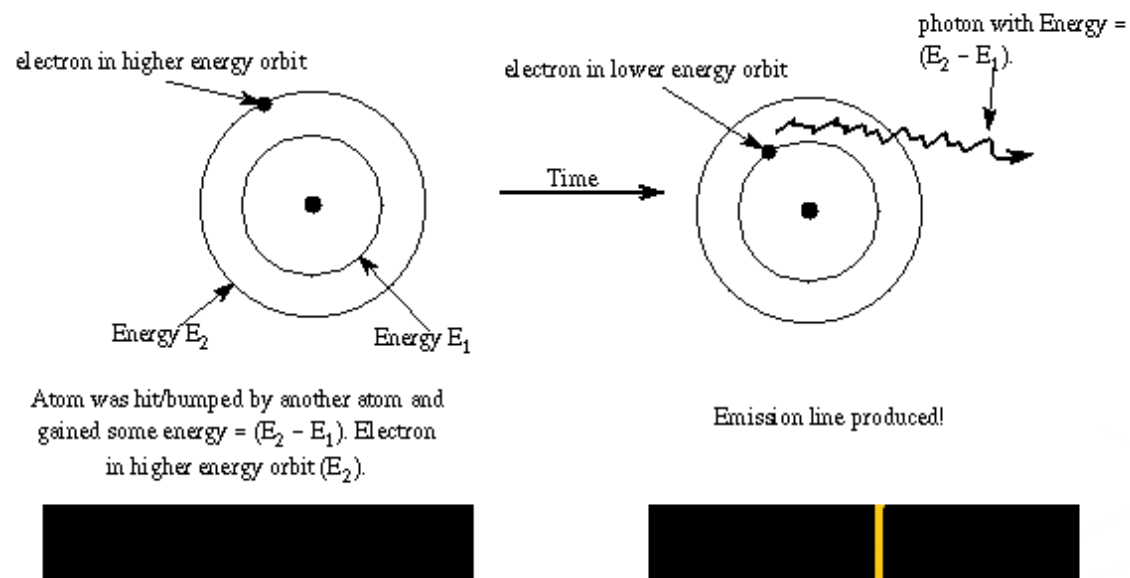
다른 종류의 스펙트럼선의 세기 그림을 겹쳐 놓으면 가능한 온도의 범위가 좁아진다. 주어진 수소선의 세기는 두 개의 가능한 온도를 의미한다(뜨겁거나 따뜻함). 이 때 헬륨선이 보이면 이 별은 뜨거운 별이다. 또 이온화된 칼슘선이 나타나면 이 별은 따뜻한 별이 된다.



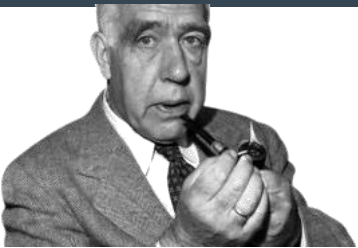
원소의 고유 색깔



Emission line



원자 구조와 양자론



Adiabatic structure $\leftarrow Z=2$

Free electron: $-\frac{(Ze)e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{m_e v^2}{r}$, $K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r}$, $U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$

$$E = K + U = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

★ Bohr, Q.E.

$$\boxed{L = mvr = n\hbar} \Rightarrow r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Ze^2 m_e} n^2 = \frac{5.29 \times 10^{-11}}{Z} n^2 (\text{m})$$

$$\Rightarrow \textcircled{E_n} = -\left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right) \frac{m_e}{2\hbar^2} \frac{Z^2}{n^2} = -\frac{mc^2}{2} \textcircled{\alpha^2} \frac{Z^2}{n^2}, \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

$$\Rightarrow r_n = \frac{\hbar}{m_e c} \frac{1}{\alpha} \frac{n^2}{Z} = \frac{\lambda_c}{2\pi} \frac{1}{\alpha} \frac{n^2}{Z} \quad \left(\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 0.0243 \text{ \AA} \right)$$

fine structure const

- radiation rate: Larmor formula

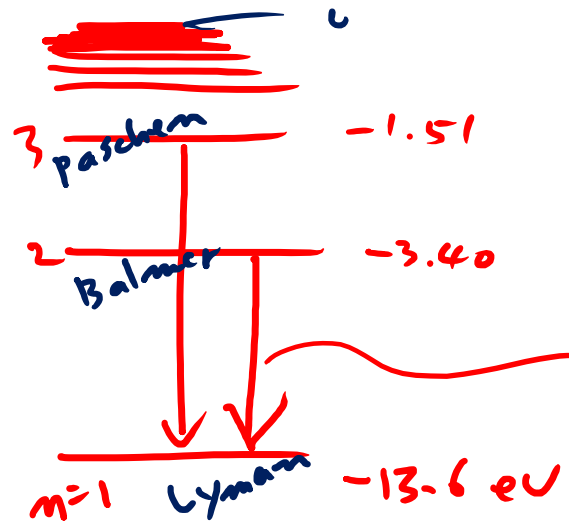
$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{a^2}{c^3} = \frac{2}{3} \hbar \alpha \frac{a^2}{c^3}$$

$$\Delta E = E_n - E_{n'} = \frac{m_e c^2}{2} \alpha^2 Z^2 \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \xrightarrow{\text{Ly } \alpha}$$

$$= 13.6 \text{ eV } Z^2 \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{2\pi\hbar c}{m_e c^2 \alpha^2 Z^2} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)^{-1} = \frac{91.16 \text{ nm}}{Z^2} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)^{-1}$$

원자 구조와 양자론 (continued)



Lyman α

$\infty \rightarrow n=1$

$\equiv \text{Ly} \alpha \lambda 1216$

$\rightarrow \overset{\circ}{\text{A}}, 121.6 \text{ nm}$

$\lambda = 121.2 \text{ nm}$

\uparrow
(Lyman forest)

흑체 복사와 양자 가설

» 흑체 (blackbody): perfect emitter and absorber

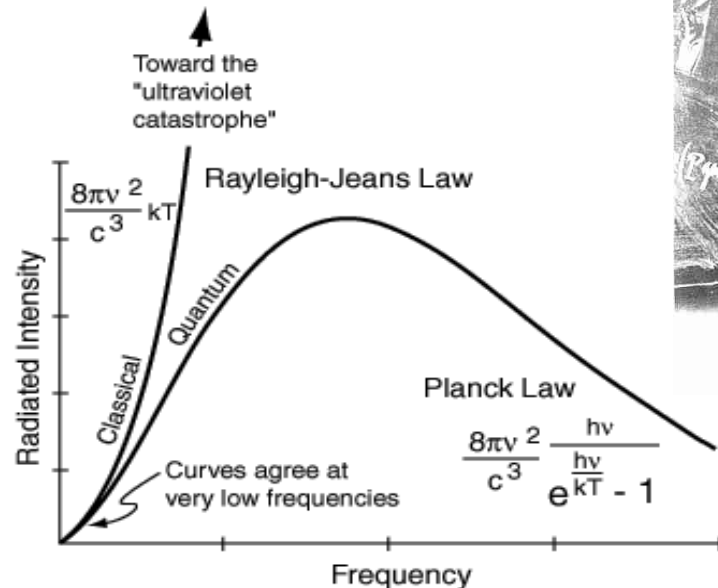
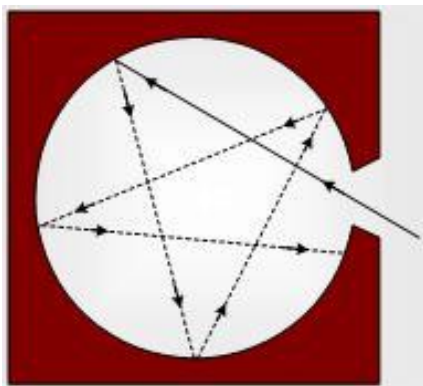
- 전자기파 에너지를 모두 흡수하고 또한 모든 파장에 걸쳐 방출(연속스펙트럼)하는 이상적인 물체
- 흡수된 에너지는 흑체를 가열.
흑체 내의 원자와 분자를 진동 또는 운동시키고 전자기파를 방출
→ black body radiation
- 흑체는 흡수율과 방출율이 같아질 때까지 복사를 흡수하여 자신을 가열
- 영도 이상의 흑체는 모든 파장에 걸쳐 에너지 방출 → 연속 스펙트럼
- 고온의 흑체가 저온의 흑체보다 더 많은 에너지 방출
- 고온일수록 최대에너지를 방출하는 파장이 짧아진다



플랑크



보어와 플랑크

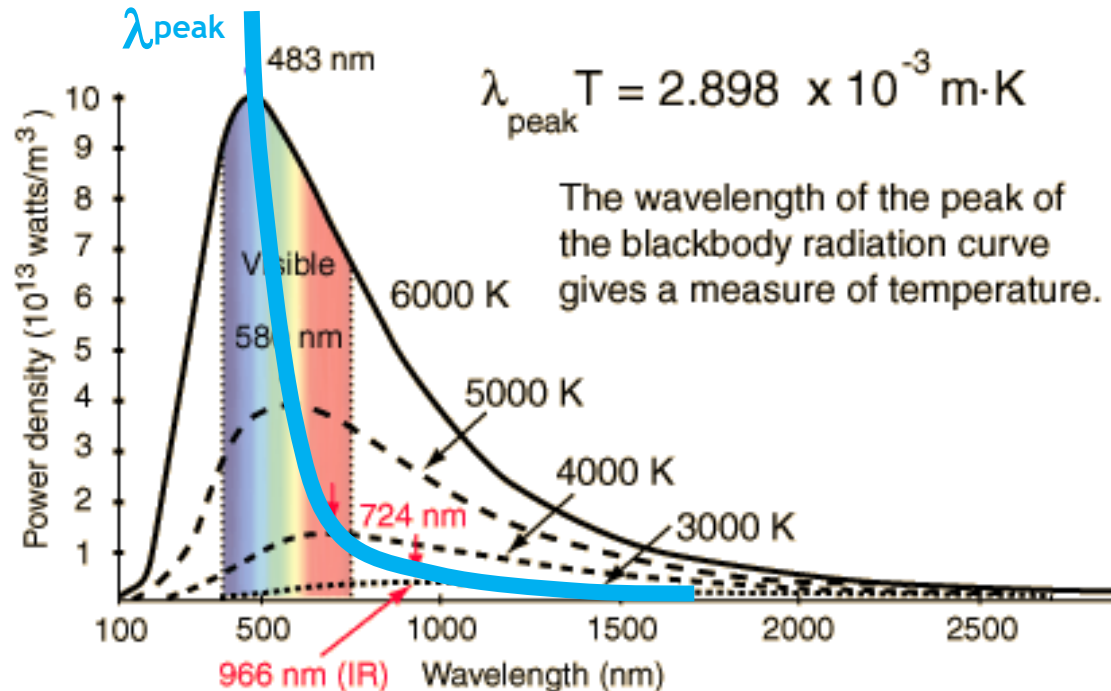


복사스펙트럼과 별의 온도

» 태양이나 별(흑체와 유사)들이 내는 복사 스펙트럼으로 온도를 추정

» **Wien Displacement Law (비인의 법칙)**

- 흑체가 최대에너지를 방출하는 파장 $\lambda_{\text{peak}} = 3 \times 10^6 / T$
- 태양: $\lambda_{\text{peak}} = 520 \text{ nm}$ (가시광), 표면온도= 5780 K



» **Stefan-Boltzman Law (스테판-볼츠만의 법칙)**

- 흑체가 시간당 면적당 방출하는 총에너지는 절대온도의 4제곱에 비례: $E = \sigma_{\text{SB}} T^4$
- 별의 일생 동안의 복사에너지

태양의 광도와 온도에 따른 별들의 광도

$$T_{\odot} = 5780 \text{ K}$$

$$F_{\odot} \approx 63 \text{ MW/m}^2$$

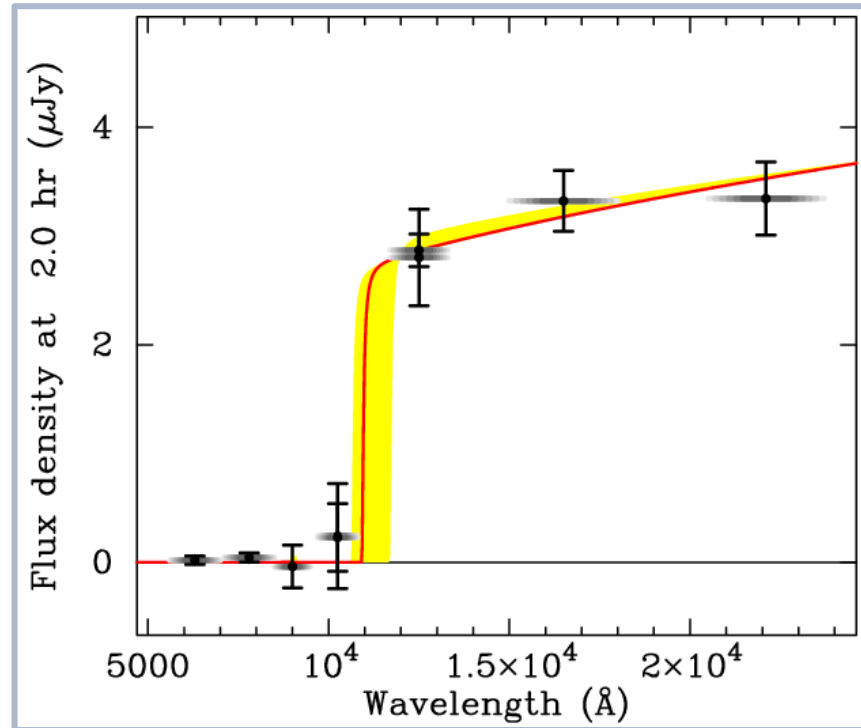
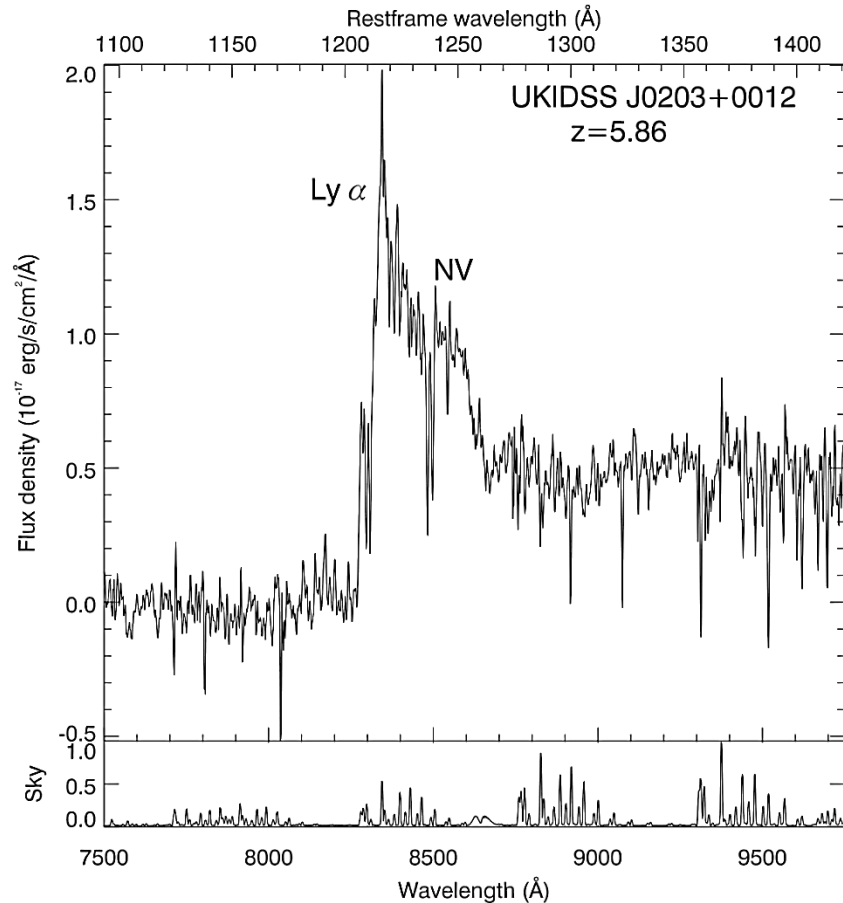
Star \rightarrow spherical blackbody

$$L = 4\pi R_s^2 F = 4\pi R^2 \sigma_{SB} T^4$$

$$L_{\odot} = 4\pi (6.96 \times 10^8 \text{ m})^2 \sigma_{SB} (5780 \text{ K})^4$$
$$= 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$$

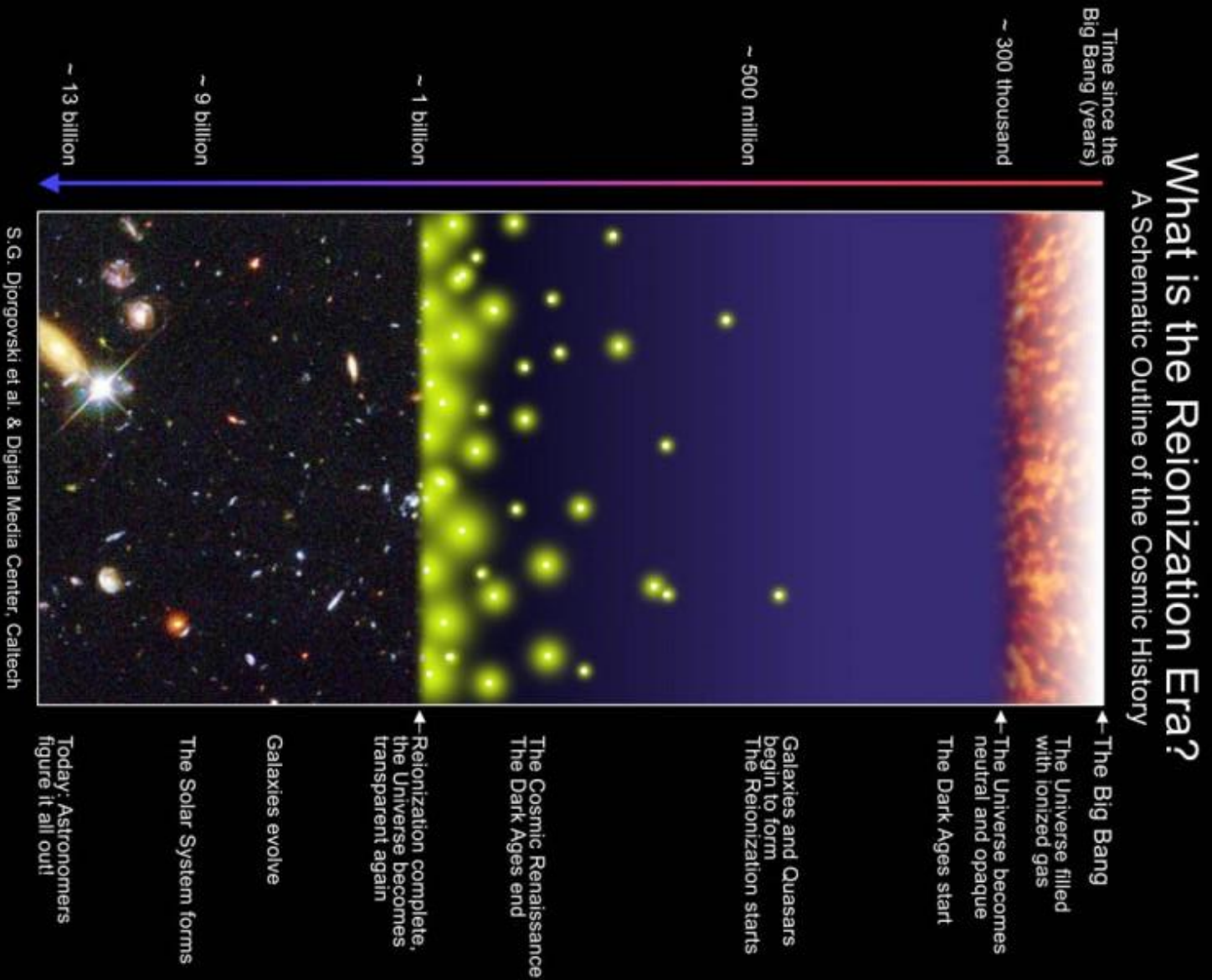
$$\therefore L = L_{\odot} \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4$$

퀘이사와 감마선폭발에서 Lyman- α



Spectral energy distribution of the afterglow of GRB120923A, showing it to be best fit (red line) by a power-law cut off by a Lyman- α break at $z \approx 8.5$. Note, photometric data have been extrapolated to a common time using the measured broken power-law light curve. “The highest redshift gamma-ray bursts”, N.R. Tanvir, July 23, 2013, [arXiv:1307.6156](https://arxiv.org/abs/1307.6156)

초기우주에서의 재이온화 과정



Lyman- α 숲의 해석에서 초기우주 연구

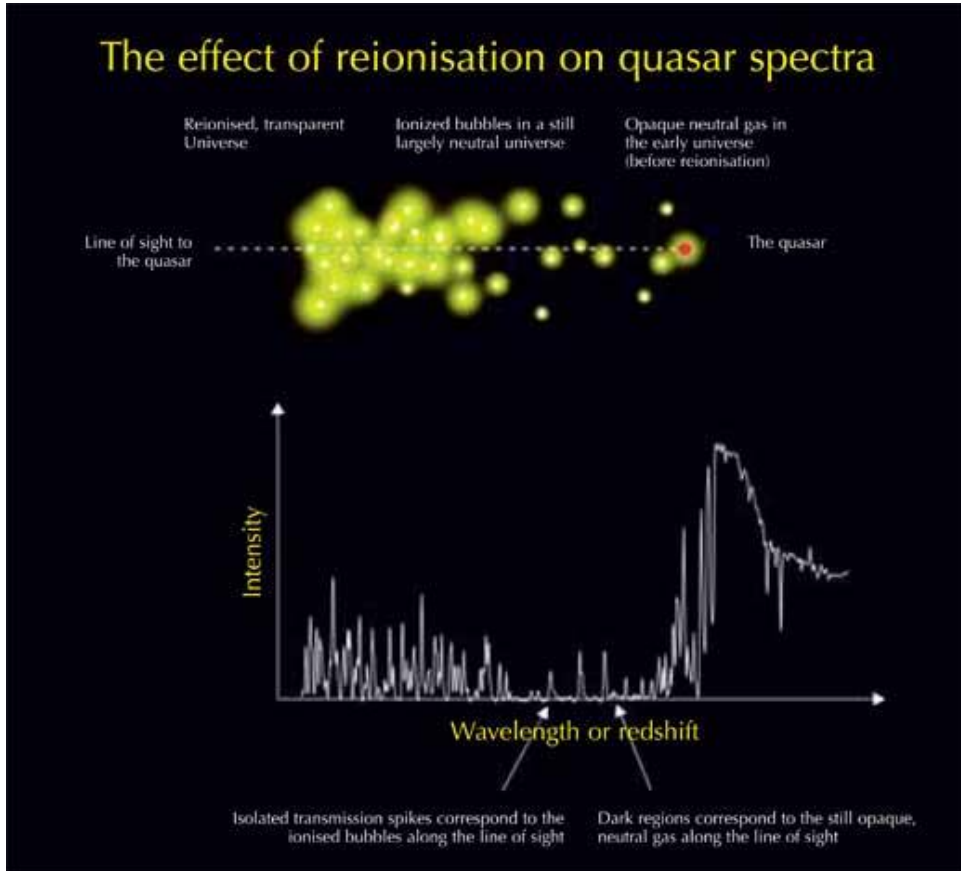


Image courtesy of SG Djorgovski and Digital Media Center, Caltech

