

02

빛의 세계

외었는가? 그럼 따라 할 수 있을 것이다.
외우지 않았는가? 그럼 창조 할 수 있을 것이다.
- 알베르트 아인슈타인 -

■ 빛이 있으라

신이 세상을 창조하면서 ‘태초에 빛이 있으라(lux in principio)’고 한 말은 우주의 탄생 시점과 관계가 있다. 최초의 빛이 존재하려는 찰나, 즉 빅뱅이 발생한 순간을 유추해 본다면 우주의 기원을 밝힐 수 있기 때문이다. 우주 천문학자들은 허블 망원경과 같이 성능 좋은 장비를 계속 개발하여 수십억 광년 거리에서 지구에 도달하는 빛을 관측하여 우리 우주의 나이를 계산하고 있다. 우주의 나이를 유추해 볼 수 있는 것은 광속 불변의 법칙과 빛이 지닌 우주 어떤 대상보다도 빠른 속도를 지닌 특성에 기인한다.

뉴턴 역학에 의하면 움직이는 대상은 큰 가속도만큼 속도를 내기위한 힘($F=ma$)을 필요로 한다. 어떤 물체가 광속이라는 속도로 달리기 위해서는 무한에 가까운 힘을 필요로 하지만, 광자는 정지질

량이 0으로 질량이 없어도 운동가능하다. 즉 광자는 탄생하는 순간 광속을 지니게 된다. 물체가 무한하게 가벼워지면 질량이 0에 수렴하게 되고, 그때의 속도는 빛의 속도에 도달하게 된다. 이는 아인슈타인의 특수상대성이론에서 증명하고 있다. 그렇다고 질량이 없다고 해서 대상이 없는 것은 아니다. 다만 광자보다 작은 척도가 없기에 광자의 크기 측정이 불가능한 것은 사실이다. 혹 가능하다더라도 광

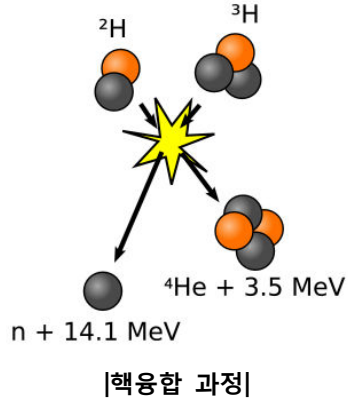


블랙홀 상상도

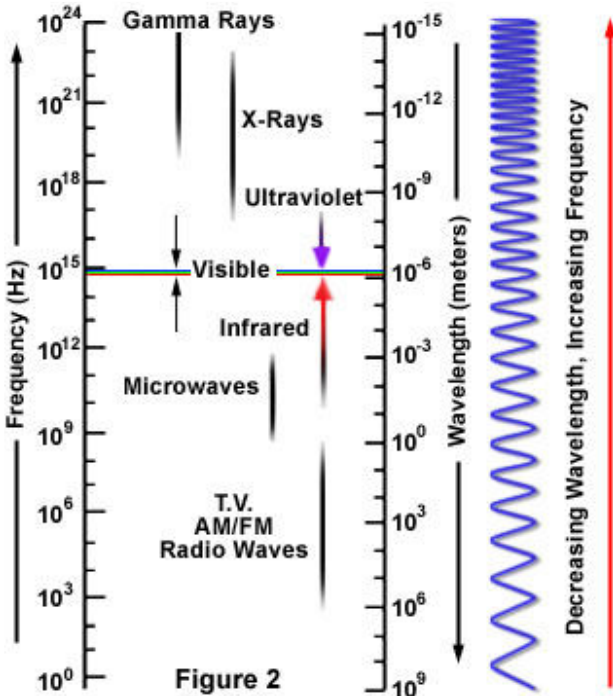
자를 정지시켜야만 하는데 빛을 관찰하기 위해서는 또 다른 빛을 필요로 하기 때문에 이는 불가능하다. 광자 정지에 관한 연구는 양자컴퓨터 개발분야에서 활발히 진행중에 있으나 100만분의 1초정도 빛을 순간적으로 가두는데 그쳤다. 블랙홀에서 광자가 탈출하지 못하여 정지할 수 있을것으로 예상했으나, 스티븐 호킹(Stephen Hawking, 1942-)박사의 블랙홀 복사 이론에 의해 블랙홀에서도 광자는 다른 에너지 형태로 복사된다고 보았다. 어떤 대상이 광속에 준하여 움직인다면 시간은 정지하고 길이차원은 0이 되며 질량은 무한히 증가하게 된다. 이런 경우는 물리적으로 불가능하여 영화속에서 가능하다. 결론은 양자적 요동으로 인해 빛은 정지시킬 수 없으며, 만약 빛이 정지한다면 더 이상 광자가 아니고 암흑(無)이 되어 버린다. 빛은 광자의 흐름으로 질량은 없으나 광속으로 달리는 에너지 덩어리(양자)로 보아야만 한다.

태양광

우리는 매일 태양으로 부터 오는 햇살을 맞으며 아침을 연다. 아침햇살은 뉴턴의 프리즘에서처럼 다양한 색을 지닌 광자의 혼합광이다. 태양이 빛을 발하는 근원은 핵융합으로 인한 에너지의 방출에 기인한다. 태양의 핵융합은 수소 연소과정으로 중수소(D, Deuterium)과 삼중수소(T, Tritium)이 만나서 3.5 MeV를 지닌 헬륨



을 형성하고 14.1 MeV의 자유중성자(neutron)을 내보내는 과정으로

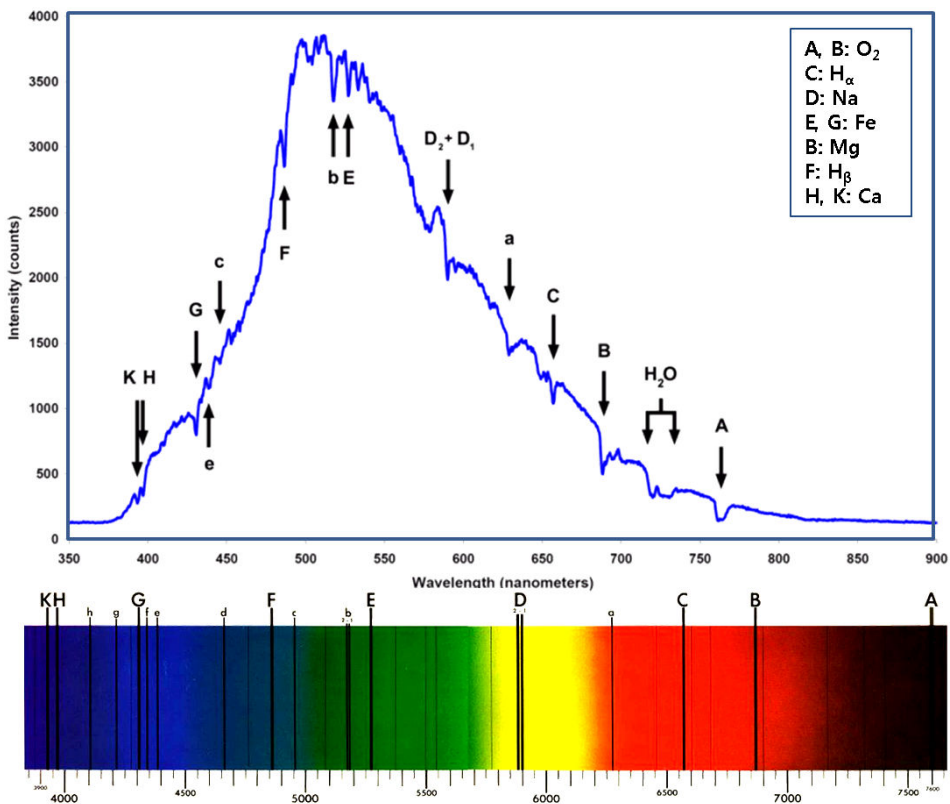


[전자기파 스펙트럼]

종결된다. 이 에너지는 곧 질량을 지닌 움직이는 무엇으로 전환할 수 있으며, 이것이 바로 태양광(광자)이 되는 것이다. 발생하는 태양광은 다양한 진동수를 지닌 전자기파의 혼합으로 구성된다. $10^8 \sim 10^2 \text{ eV}$ 수준의 에너지는 감마선과 엑스선이 지니며 원자내 중심 전자의 병진운동

(translation)에 영향을 준다. $10 \sim 10^3$ eV의 UV는 원자와 분자내 전이 전자의 병진운동에 영향을 준다. 적외선($1 \sim 10^3$ eV)은 분자 진동(vibration)에 관여하고 마이크로파($10^{-3} \sim 10^{-6}$ eV)는 분자 회전(rotation)에 영향을 준다. 작은 에너지를 지닌 전자기파(라디오파)일수록 파장이 길어서 건물을 뛰어넘게 되며, 짧은 파장을 지닌 큰 주파수의 전자기파(엑스선)는 세포 및 분자수준에서 영향을 준다. 이러한 차이로 라디오파는 건물이 있는 곳에서도 원거리 수신이 가능하며, 엑스선으로 인체 투과영상을 얻을 수 있다.

백색광(white light)을 스펙트럼 분해하면 연속적인 스펙트럼



[프란츠호퍼 선과 태양광의 흡수 스펙트럼]

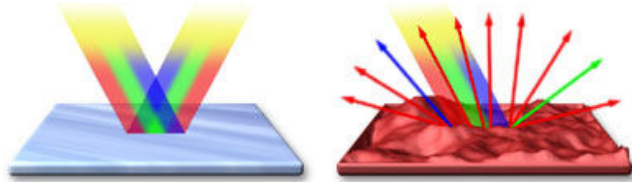
으로 보이지만, 태양광의 스펙트럼은 자세히 살펴보면 검은 띠를 지닌 흡수 스펙트럼을 보인다. 이는 태양광이 지구로 이동중에 다양한 기체와 지구대기에 흡수되면서 발생하는 것으로 특정 기체에 대한 정보를 나타낸다. 독일의 프라운호퍼(Joseph Fraunhofer, 1787-1826)는 태양의 스펙트럼을 더욱 자세히 조사하여 324개의 암선을 관찰하였고, 이를 프라운호퍼 선이라고 칭하였다. 이는 빛의 일부가 태양 표면의 역변층(reversing layer) 중의 여러 원소에 의해 흡수된 것이고, 일부는 지구대기 중의 흡수된 것으로 H, He, Fe, Na, Ca, O₂에 의한 흡수선들이다. 현재는 수천개의 암선이 관찰되고 있으며, 프라운호퍼의 분류에서 뚜렷한 암선을 보이는 부분은 영문 대문자로 표시하고 있다. 이후 키르히호프(Gustav Kirchhoff, 1824-1887)는 특정한 원소에 따라 고유의 스펙트럼이 있다는 것을 관찰한다. 불꽃 반응시 나트륨은 159, 590 nm에서 휘선을 보이며, 리튬은 413, 460, 497, 611, 671 nm 파장에서 휘선 스펙트럼을 보인다. 즉, 어떤 물질이 특정한 온도에서 특정한 파장을 방출하는 능력과 흡수하는 능력이 같다는 키르히호프의 법칙을 알아낸다. 이로부터 프라운호퍼 선은 태양표면의 상대적으로 차가운 기체에서 흡수된 결과라는 것을 알게된다.

백색광은 다양한 광원으로 만들어 낼 수 있지만 가장 큰 광원은 태양이다. 형광(fluorescent)이나 텅스텐 램프를 이용한 백열광(incandescent)으로도 백색광을 만들 수 있다. 태양광이 혼합광으로 다양한 파장을 지닌 전자기파라는 것의 이해는 일상에서 관찰되는 여러가지 현상을 이해하는 데 도움이 된다. 빛의 반사, 굴절, 간섭 등을 이해하면 신기루, 아지랑이, 무지개, 오로라, 오메가현상 등과 같은 자연현상을 이해할 수 있게 된다.

■ 반사

빛의 성질중에 가장 먼저 접할 수 있는 것은 화장실에 비친 자신의 모습이다. 즉 반사

(reflection)에 의한 현상을 관찰하게 된다. 모든 물체는 빛에 노출되면 표면의



[정반사와 난반사 비교]

굴곡이 있는 정도에 따라서 정반사(specular reflection)이나 난반사(diffuse reflection)을 하게 된다. 거울은 매끄러운 표면을 지녀 입사광이 반사의 법칙에 따라 정반사하여 우리의 얼굴을 볼 수 있게 된다. 반면 종이에 입사된 빛은 울퉁불퉁한 표면에서 난반사하여 빛이 사방으로 퍼져 산란(scattering)하게 된다.

불투명한 유리는 한쪽 면을 거칠게 가공한 것인데, 이곳에 물을 뿌리거나 투명 테이프를 붙이면 거친 표면이 상쇄되고 빛이 잘 투과하게 되어 난반사 없이 투명하게 된다. 고속도로의 표시선은 유리가루를 혼합한 페인트를 칠한 것으로 야간에 미세한 빛을 받더라도 난반사를 일으켜 운전자로 하여금 다양한 방향에서 표시선을 잘 인식할 수 있게 해준다. 금속표면의 반짝거리는 것은 반사와는 다르게 광전자의 발생으로 인한 것으로 추후에 다시 다루기로 한다.

거울반사가 늘 평면에서만 발생하는 것은 아니며 반사면의 곡률에 따라서 상의 왜곡이 발생한다. 손가락의 볼록한 면으로 얼굴을 바라보면 똑바로 보이지만 오목한 면에서는 뒤집어진 역상을 관찰할 수 있다. 오목거울(concave mirror)은 빛을 모으는 역할을 하여 희

미한 빛을 관찰하는 망원경에 사용된다. 볼록거울(convex mirror)은 자동차의 후방

관찰거울에 응용되며 멀리있는 상이 보다 가깝고 작게 보이게 한다.

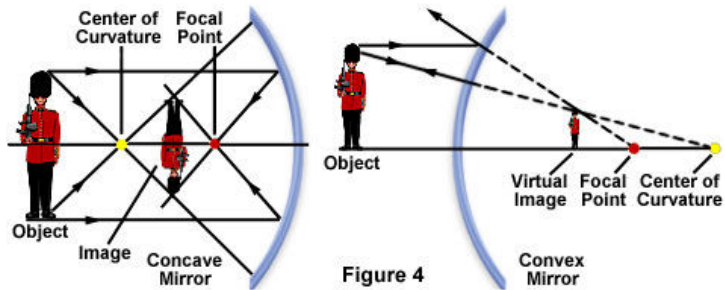


Figure 4 |오목거울과 볼록거울의 이미지 차이

골목길 교차지

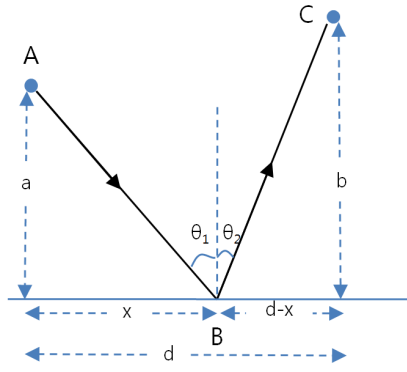
점에 볼록거울을 설치하여 멀리서도 차가 오는지 관찰할 수 있도록 만들어준다. 두 거울에 맺힌 상의 차이는 초점이 대상물의 내부에 맺히는 오목거울과 외부에 맺히는 볼록거울의 특성에 따라 변하게 된다.

광선이 거울에서 반사될 때 우리는 입사각과 반사각을 동일하게 그리게 된다. 사실 입사되는 광선은 하나가 아닌 다양한 입사각을 지닌 무수히 많은 빛다발이며 따라서 다양한 경로로 반사한다. 그러나 거울에서 반사될 때 택하는 경로는 주변의 경로에 비하여 소요시간이 가장 짧은 경로를 택하게 된다. 이를 페르마(Pierre de Fermat, 1601-1665)의 원리라고 하며 광로 최단거리, 동일시간 최고거리(최단시간)를 갖는 경로로 입사각과 반사각이 일치하는 각을 택하게 된다. 이로부터 빛의 직진성, 반사의 법칙, 굴절의 법칙 등을 검증할 수 있다. 반사의 법칙은 입사각과 반사각이 같다는 것이고, 굴절의 법칙은 한 매질에서 다른 매질로 빛이 진행할 때 입사각(θ_1)과 굴절각(θ_2)의 $\sin \theta_1 / \sin \theta_2$ 의 비가 일정하다는 것이다.

최단거리를 갖는 경로에 대한 반사의 법칙은 빛의 경로의 미

분값(dy/dx)이 0으로 될 때 구할 수 있다. 주어진 시간동안 빛의 경로가 같을 때, 미분한 값은 반사의 법칙 유도과정처럼 구할 수 있다. 각각의 입사각과 반사각의 $\sin \theta$ 값이 동일해 지며, 입사각과 반사각이 일치하는 각으로 빛이 반사된다.

■ 페르마의 반사의 법칙



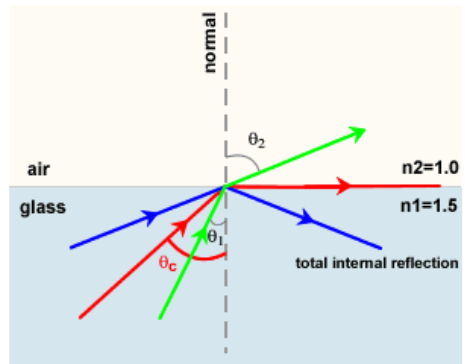
$$y = \overline{AB} + \overline{BC} = \sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

$$\rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} + \frac{-(d-x)}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}} = 0$$

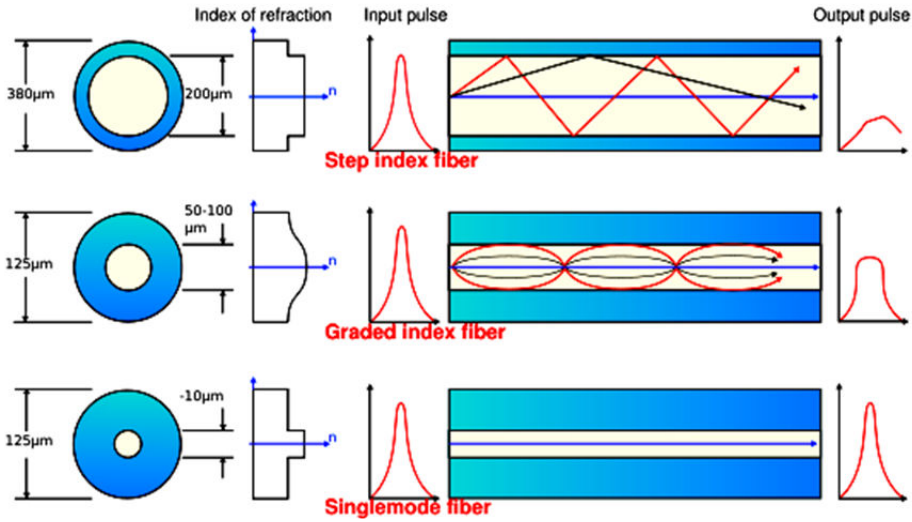
$$\sin \theta_1 = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}} = \sin \theta_2$$

$$\therefore \theta_1 = \theta_2$$

정반사하는 과정에서 이름이 비슷한 전반사(total reflection)가 일어나는 경우도 있다. 정반사는 빛이 반사되는 양과 상관없이 반사되는 각이 반사의 법칙을 따르는 것이고, 전반사는 반사되는 각에 상관없이 빛이 반사되는 양이 100%인 반사를 말한다. 반드시 빛이 굴절률(refractive index)이 큰 물질(물)에서 굴절률이 작은 물질(공기)로 입사할 때 발생하는 것으로, 임계각까지는 물밖으로



[유리-공기 매질에서의 전반사 발생]



[광섬유 종류에 따른 정보 전달 형태]

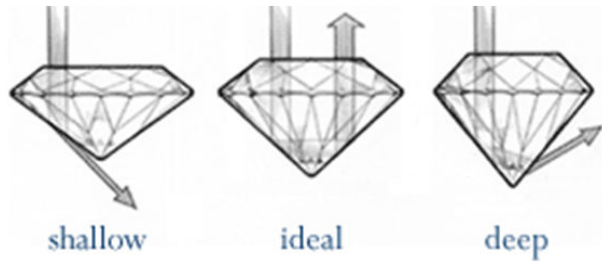
빛이 굴절되어 나가지만 그 이상의 각도가 되면 그 경계면에서 빛이 전부 반사하여 굴절광선이 존재하지 않게 된다. 여기서 굴절률은 진공에서의 빛이 속도에 대한 매질내 상대속도의 비(c/v)이다. 부분반사를 일으키는 유리판에서도 전반사가 발생한다. 유리판을 점점 기울이다 보면 반사되는 자신의 얼굴이 투과된 외부 이미지와 겹치지만, 더 기울이면 자신의 얼굴만 보이게 된다. 임계각은 두 매질의 굴절률(n)의 비로서 $\sin \theta_1 = n_2/n_1$ 식에서 각도를 계산할 수 있다. 공기(n_2)와 물(n_1)의 굴절률은 각각 1, 1.33으로 물에서 공기(진공)로 빛이 입사하는 경우의 임계각은 48° 정도이며, 유리의 굴절률은 1.52로 임계각은 42° 이다. 대상 매질의 굴절률만 알면 두 매질의 경계에서 발생하는 전반사의 임계각을 계산할 수 있다. 전반사는 광통신, 위내시경, 쌍안경 등에 이용되며, 프리즘의 임계각은 45° 보다 작으므로 빛의 진행방향을 90° 또는 180° 로 바꿀 수 있다.

광통신은 정보를 빛에 실어서 전달하는 것으로 광섬유내부에

서 빛의 전반사를 통해 정보 손실을 최소화 하여 정보전달의 질을 기존의 통신망 보다 월등히 개선하였다. 광섬유는 보통 실리카 재질의 core와 clad로 구성되어 있다. Core의 굴절률을 clad 보다 크게 하여 내부 전반사를 유도하며, 입사광의 각이 임계각이상이 되도록 한다. 광섬유는 core의 두께에 따라서 단일모드, 복합모드 등으로 구분되며, 굴절률의 차이로 인해 전달되는 정보의 형상이 달라진다. 초창기에 개발되었던 유리 광섬유는 유연성이 떨어져서 파손의 위험성을 수반하고 있었으나, 최근에는 플라스틱 광섬유(POF, plastic optical fiber)가 개발되어 가공성이 용이해 지고 있다. POF는 core에 아크릴 계의 PMMA(polymethyl methacrylate)와 불소처리 한 F-PMMA를 clad로 사용하고 있다.

결혼 예물로 다이아몬드를 선물하게 되는데, 여기에도 전반사의 개념이 들어간다. 다이아몬드의 수많은 입사면은 전반사가 잘 발생되도록 적절한 각도로 깎아 만든 것으로, 중앙의 입사면(table)으로 입사된 입사광이 상층부(crown)를 지나 반사면(pavilion)을 만나

되반사 하여 반짝거리게 된다. 얇게 깎아서 pavilion이 높게 되면 빛은 투과해 버리고, 너무 깊게 깎아도 빛은 제대로 전반하지 못한다. 다이아몬드와 공기



[다이아몬드 커팅에 따른 전반사 차이]

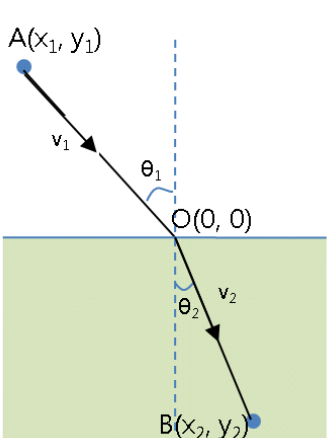
매질사이의 임계각에 맞춰 가공했을 때에만 다이아몬드가 빛나게 된다. 즉 가공하는 사람에 따라 다이아몬드의 화려한 빛도 없어질 수

있다. 다이아몬드의 해석에는 반사뿐만 아니라 굴절이라는 현상도 개입하게 된다.

■ 굴절

빛이 공기와 다른 매질인 물이나 유리, 다이아몬드로 들어가면 진행 방향이 바뀌는 것을 굴절(refraction)이라고 하며, 매질(굴절률)에 따른 빛의 진행 속도 차이를 보인다. 자연에서도 이런 굴절 현상을 쉽게 관찰할 수 있으며, 신기루, 아지랑이, 반짝이는 별, 얇아 보이는 수영장 등이 있다. 이러한 현상을 이용하여 안경, 카메라, 현미경, 망원경 제작을 위한 렌즈를 만든다.

■ 페르마의 굴절의 법칙



$$t = \frac{AO}{v_1} + \frac{OB}{v_2} = \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{v_2}$$

$$\rightarrow \frac{dt}{dx} = \frac{x_1}{v_1 \sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \frac{-x_2}{v_2 \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} = 0$$

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{x_1}{v_1 \sqrt{x_1^2 + y_1^2}} = \frac{x_2}{v_2 \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

$$\therefore \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_2}{v_1} = \text{constant}$$

매질에 따른 빛의 진행 속도 차이는 포장도로에서 진흙길로 비스듬히 진입하는 자동차의 진행방향이 꺾이는 현상으로 이해할 수 있다. 같은 속도로 회전하는 바퀴중 오른쪽 바퀴가 진흙길에 먼저 진입하면, 진입한 바퀴는 진흙길에 묻혀 속도가 느려지지만 왼쪽 바퀴는 여전히 빨리 회전하므로 차의 진행방향이 오른쪽으로 휘어진다. 즉 굴절률이 큰 매질 쪽으로 진행 방향이 휘어지게 된다. 굴절의 법칙은 최단시간을 소요하는 경로를 따라 빛이 진행된다는 페르마의 원리로 해석할



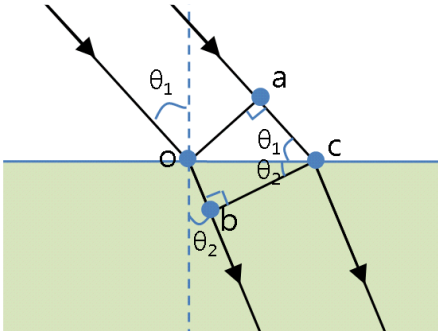
굴절을 이용한 작품사진

수 있다. 굴절되는 빛의 이동시간의 최소값(dt/dx)을 0으로 만드는 값을 찾으면, 입사각과 굴절각의 사인값 비율이 일정하고 이는 곧 매질내 속도의 비로 계산된다. 이를 이용하면 매질내 빛의 속도 차이를 계산할 수 있다. 진공에서의 빛의 속도는 30만 km/s이나, 물에서는 23만 km/s, 석영은 21만 km/s이며, 다이아몬드는 40%까지 광속이 감소하여 124,000 km/s의 속도를 갖는다. 다이아몬드는 가공하는 각도에 따른 전반사와 매질내 속도감소 현상으로 빛을 더 오래 머무르게 한다.

스넬(Willebrord Snellius, 1580-1626)의 굴절법칙은 두매질의 사인값 비가 두매질의 굴절률의 비로 일정하다는 점에서 페르마의 원리와 상응한다. 굴절률의 비는 상대굴절률로 n_{12} 로 표시한다. 스넬의 법칙은 앞선 소개에서 처럼 자동차의 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴가 회

전한 시간은 포장도로나 진흙길이나 같다는 원리를 이용한다. 즉 매질1에서 임의 길이만큼 이동하는데 걸린 시간은 매질2에서도 동일하게 소요된다. 이를 이용하여 소요시간을 '이동거리/매질내 속도'로 표현하여 관계식을 찾으면 쉽게 스넬의 법칙($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$)을 구할 수 있다.

스넬의 굴절의 법칙



$$\text{time for } \overline{ac} = \text{time for } \overline{ob}$$

$$\rightarrow \frac{\overline{oc} \times \sin \theta_1}{c/n_1} = \frac{\overline{oc} \times \sin \theta_2}{c/n_2}$$

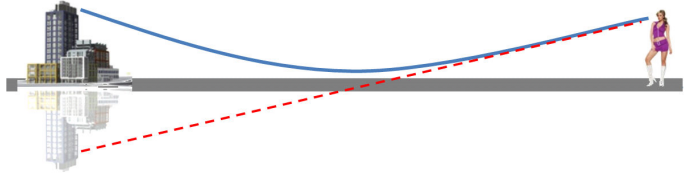
$$\therefore n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

동전이 담긴 컵을 바라보면 떠 있는 것처럼 보이는데 이는 빛의 직진성에 의한 착시현상으로 굴절된 허상이다. 즉 우리는 빛이 직진한다는 것을 직감적으로 인지하고 있기 때문에 굴절각 위치에 있는 동전이 굴절각과 입사각의 편차만큼 보정되어 떠 있는 것처럼 보인다. 이런 착시현상은 수영장에서 익사사고를 부르기도 한다. 깊지 않은 듯이 보이는 수영장이 실제로는 훨씬 깊다는 것을 눈이 아닌 몸으로 알게 되기 때문이다.



굴절로 인한 착시

또 다른 굴절에 의한 착시현상인 신기루(mirage)는 물체가 실제의 위치가 아닌 위치에서 보이는 현상이다. 한여름의 아스팔트나



[뜨거운 아스팔트위 신기루 현상]

사막처럼 바닥에 인접한 공기층과 대기층의 기온차이로 인해 발생되는 거짓 영상을

을 보는 것이다. 차가운 공기층이 따뜻한 공기층보다 공기가 밀집하여 밀도가 큰 상태가 되고, 이 지역을 빛이 통과하면 차가운 공기층이 따뜻한 공기층보다 굴절률이 높은 렌즈효과를 가져오게 된다. 차가운 공기층에서 아스팔트 위 따뜻한 공기층으로 빛이 진입하면서 속도가 빨라지고 굴절되면서 관측자에게는 직진하는 빛에 의한 허상을 보게 된다. 이때 빛의 직진성에 대한 착각으로 인해 먼 거리에 있는 물체가 비취 보이는 것으로, 사막이나 기온차가 심한 지역에서 쉽게 발생한다. 신기루가 발생하는 기상 조건일 경우 빛과 같은 전파는 일반적인 전달 거리보다 먼 거리에서 수신이 가능하게 되는 현상도 일어난다. 이를 신기루효과라고 한다. 이러한 대기굴절 또는 지상굴절현상인 신기루는 세부적으로는 떠오름(looming), 가라앉음(sinking), 땅거울(road mirage, sand mirage) 등으로 구분되며 사막의 신기루는 땅거울에 해당한다.

유리나 물에 입사한 빛은 굴절률에 따라서 휘어지는 정도의 차이를 보이고, 다시 공기로 나오는 빛은 다시 한 번 굴절을 하게 되어 최초의 입사각으로 나오게 된다. 이 과정에서 매질내 빛의 속도의 감소가 발생하고 비스듬히 바라보이는 물체의 깊이가 왜곡된다. 이러

한 굴절 정도가 단순히 매질의 굴절률에만 의존하는 것이 아닌 백색광을 구성하고 있는 개별 단색광들의 파장대에 따라서도 달라지는 것을 관찰되었고 이를 분산(dispersion)이라고 한다.

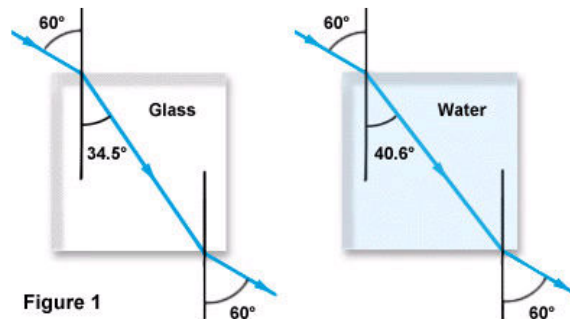
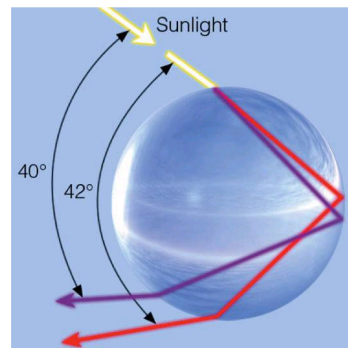


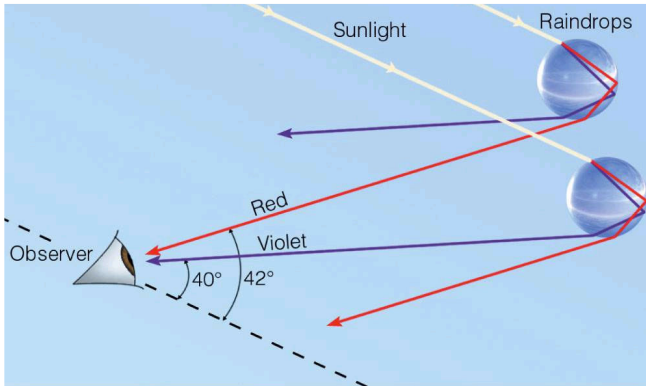
Figure 1

재굴절 되는 입사광

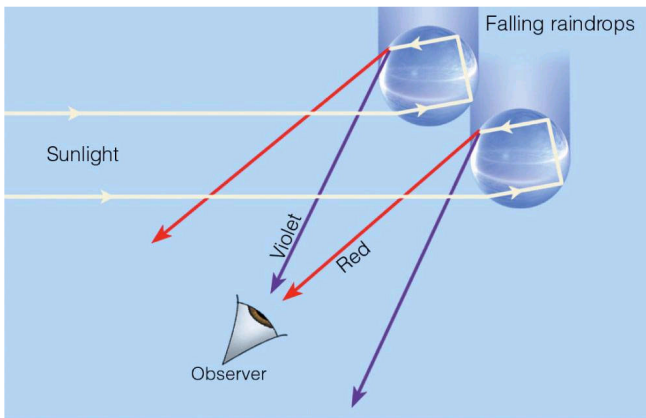
물의 굴절률은 1.33으로 어림잡아 보고 있지만, 광원이 되는 램프를 어떤것을 쓰느냐에 따라 발색광이 달라지며 측정하는 물의 굴절률도 달라진다. 즉 파장이 하나인 청색광(F-line, 486 nm)의 경우 물의 굴절률이 1.337로 변하며, 적색광(C-line, 656 nm)은 1.331로 측정된다. 이 둘은 수소 램프를 이용하여 만들 수 있으며, 나트륨 램프는 노란색광(D-line, 589.3 nm)을 보이며 1.333의 굴절률을 나타낸다. 매질내 빛의 분산도는 세가지 단색광 조사시의 굴절률의 편차로 표현된다. 즉, 분산도(v)는 $[n(D)-1]/[n(F)-n(C)]$ 이며, 물은 분산도가 55.5이다. 매질의 굴절률이 클수록 적색광과 청색광의 굴절되는 정도가 커지게 된다. 다이아몬드($n=2.417$)에 45° 로 입사되는 백색광은 16.6° (청색광)에서 17.0° (적색광)을 보이는 반면, 얼음($n=1.309$)은 32.4° (청색광)에서 32.7° (적색광)을 나타낸다. 파장이 짧을수록 더 많이 굴절하며, 이러한 현상은 프리즘에서 무지개색이 관찰되는 이유가 된다.



물방울내 빛의 굴절-반사



[1차 무지개의 굴절현상]



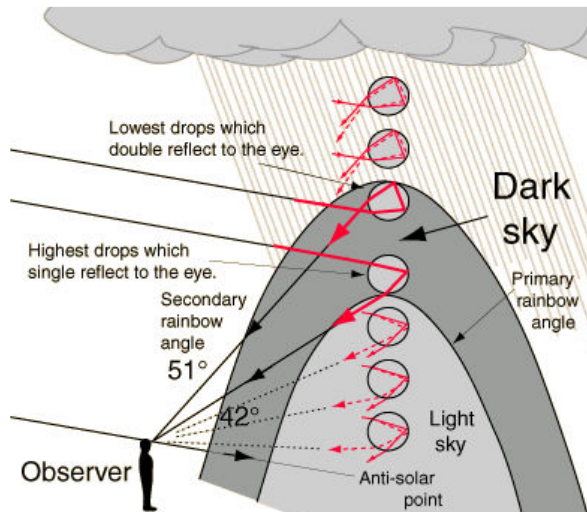
[2차 무지개의 굴절현상]

비온 뒤에 관찰되는 무지개는 파장대에 따른 굴절차이로 인한 현상으로, 굴절-내부반사-굴절이라는 연속과정을 거치게 된다. 무지개는 태양의 고도가 낮고 한쪽에는 비가오고 다른쪽에는 햇볕이 들 때 발생한다. 수만개의 작은 물방울들은 프리즘 역할을 하여 적색에서 보라색까지 파장대에 따른 굴절각의 차이를

보이게 되고, 특정 관찰위치에서 반원형의 무지개를 관찰할 수 있게 된다. 모든 물방울은 빛을 분산시켜 스펙트럼을 만들지만 관찰자에게는 특정각도의 한가지 빛만 전달된다. 적색은 가장 작게 굴절하여 42°의 각을 보이면서 우리눈에 도달하는 반면 보라색은 40°의 굴절각을 지닌다. 보다 위쪽에 있는 물방울들이 적색을 굴절-반사-굴절 시키고 아래쪽의 물방울들이 보라색을 내보낸다. 아래쪽의 물방울에서 보라색을 관찰했다면 적색의 빛은 다리쪽으로 향했을 것이다. 조금만

위치를 바꾸면 방금전에 봤던 무지개가 아닌 조금씩 다른 무지개를 관찰하게 된다. 즉 무지개는 단 하나의 것이 아니라 관찰자의 눈높이, 위치등의 조합으로 각자 자기만의 무지개를 관찰하는 것이다. 따라서 무지개 끝에 보물이 묻혀 있다고 해서 그곳을 찾아 가는것은 불가능하다. 가끔가다가 쌍무지개가 뜨는 경우가 있다. 이는 2차 무지개로 시반경 51° 를 지니며 1차 무지개와는 반대의 색배열을 보이며, 2차 무지개는 1/10 정도의 빛의 세기를 보인다.

1차 무지개의 경우, 우리눈에 들어오는 무지개색 이외에 굴절되어 온 빛들은 무지개를 형성하는 42° 보다 높게 비치게 되고 이는 혼합광을 형성해 밝은 하늘(light sky)를 형성한다. 따라서 무지개 아래는 맑은 시야를 보게 된다.



[쌍무지개로 인한 흑띠의 형성과정]

반면, 2차 무지개에서는 51° 보다 낮게 굴절된 빛들이 모여서 2차 무지개 위쪽을 밝게 만든다. 결국 쌍무지개가 뜨면 1차와 2차 무지개 사이는 굴절되는 빛이 모이지 않게 되어 어두운 하늘(dark sky)를 만들게 된다. 이를 알렉산더의 흑띠(Alexander's dark band)라고 부른다. 쌍무지개의 경우, 1차 및 2차 무지개를 형성하는 물방울에서 굴절되어온 사출광의 간섭에 의해 1차 무지개의 안쪽과 2차 무지개의 바깥쪽에 얇은 핑크색이나 녹색의 여분의 띠(supernumerary arc)가 형

성된다. 이를 과잉무지개라고 한다. 이외에 반사무지개(reflection rainbow), 안개무지개(fogbow), 수평무지개(horizontal rainbow) 등도 모두 물방울내 입사하는 여러과장대의 빛들의 굴절과 반사로 인한 자연의 경이로운 현상이다.

■ 간섭

■ 얇은 필름에서의 간섭 발생 조건

Optical pathlength difference Γ :

$$\Gamma = n(AB + BC) - AD$$

$$AB = \frac{d}{\cos \beta} \quad AD = (2d \tan \beta) \sin \alpha$$

$$AD = 2d \tan \beta (n \sin \beta)$$

Collecting terms:

$$\Gamma = 2nd \left[\frac{1}{\cos \beta} - \tan \beta \sin \beta \right]$$

$$\Gamma = 2nd \left[\frac{1 - \sin^2 \beta}{\cos \beta} \right] = 2nd \cos \beta$$

Destructive $\rightarrow 2nd \cos \beta = m\lambda$ \leftarrow Constructive
 Phase change = π Phase change = 0

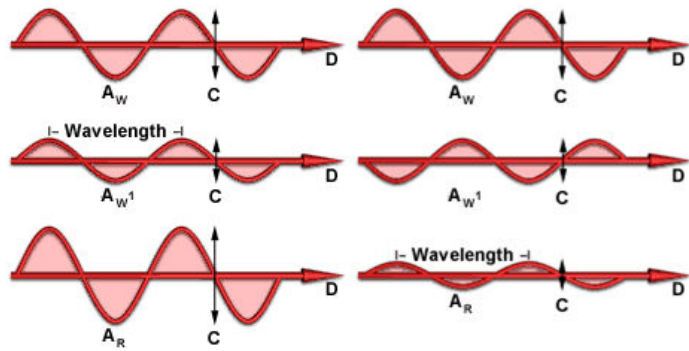
Constructive $\rightarrow 2nd \cos \beta = (m - \frac{1}{2})\lambda$ \leftarrow Destructive

비눗방울을 만들어 붙어보면 방울 표면에 다양한 색들이 보이는 것을 경험할 수 있다. 이는 비눗방울도 일정두께를 지니고 있기 때문에 입

사하는 빛이 공기와 다른 매질을 통과하면서 굴절되어 반사하게 된다. 입사된 빛은 비누막의 바깥 표면에서 180° 위상변화(phase change)가 생기는 반면, 막의 안쪽 표면에서는 공기와 다른 막의 굴절률로 인해 입사광에 대한 내부 반사에서 180° 위상변화를 일으키지 않는다. 이과정에서 비눗방울 바깥쪽 표면에서 반사된 빛과 비눗방울의 안쪽 표면에서 굴절되어 반사된 빛의 위상차이가 발생한다. 두 빛의 위상차는 막의 두께와 빛의 파장에 따라 달라지며, 이 과정에서 성질이 다른 두 빛이 서로간에 방해를 받게 된다. 이를 간섭(interference)라고 하며, 위상차이가 180° 가 되면 해당 파장의 진폭이 사라지는 상쇄 또는 소멸간섭(destructive interference)가 발생되고 동일위상일 경우 파장의 진폭이 증가하는 보강간섭(constructive interference)가 발생한다. 기름이 유출된 바닷가의 얇은 기름막에서도 이러한 현상이 관찰된다.

빛을 파동이라고 했을 때, 각각의 파동이 일정하게 주어진다 면 간섭된 결과도 일정하게 유지되어 세기의 분포 모양인 간섭무늬를 형성한다. 이는

파동의 중첩에 의해 형성된다. 진폭이 같은 두 개의 파동이 만나면 두파의 마루와 골이 정확하게 일치하여



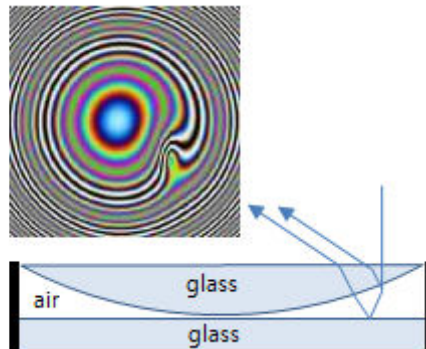
[보강간섭과 상쇄간섭에서 진폭(A)의 변화]

합성된다는 것으로 중첩되어 진폭은 2배가 되지만 세기는 4배가 되는

완전보강간섭을 이루게 된다. 만약 서로 반대위상을 지닌 동일 파동이 만나면 진폭과 세기가 모두 0이 되는 완전소멸간섭을 만든다. 이는 두 개의 조약돌을 호수에 던져서 생긴 수면파의 간섭 현상과 동일하다.

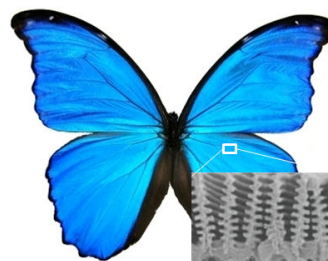
간섭무늬는 뉴턴 링(Newton's ring)이라는 실험에서도 관찰된다. 평평유리판에 한쪽이 볼록한 렌즈를 겹쳤을 때, 렌즈의 곡률에 따라 공기층의 두께가 달라져 밝고 어두운 동심원이 나타난다. 이 또한 빛의 간섭 현상으로 발생한다.

얇은 막이 아닌 표면의 균일한 형태 때문에 발생하는 구조적 간섭으로 인한 발색 현상도 있다. 쉽게는 보석류인 오팔, 오색찬란한 나비의 날개나 공작새의 깃털에서도 관찰된다. 구조적색상(structural color)은 빛이 균일한 형태를 지닌



[뉴턴 링을 이용한 간섭 실험]

구조 내부로 들어와서 서로간에 중첩되는 과정에서 보강간섭을 일으키는 빛만 발산하는 원리를 가지고 있다. 보는 각도에 따라 달라지는 빛이라고 해서 훈색(iridescence)라고 한다. 일본 테진(Tejin)에서 개발한 모르포텍스(Morphotex)라는 섬유제품은 이런 발색원리를 이용한 것으로 염료를 사용하지 않고도 엷은 무지개색을 발산하게 된다. 일정한 간격으로 61층을 적층시킨 나일론/폴리에스테르 층은 굴절률의 차이를 보이고 이로 인해 굴절광의 위상차가



[모르포 나비]

발생하여 간섭현상이 나타난다. 이러한 원리를 이용하여 다양한 색을 자연발색하는 광결정 소재를 만들기도 한다. 간섭에 관한 보다 자세한 내용은 회절(diffraction)을 설명하는 부분에서 다루기로 한다.

■ 산란

푸른하늘은 대기속의 기체 분자들에 의한 가시광의 산란(scattering) 효과로 나타난다. 기체 분자들이 가시광선의 파장보다 1/10이하로 훨씬 작기 때문에 레일리(John Rayleigh, 1842-1919) 산란이 발생하며, 산란된 빛은 지상으로 전파된다. 광산란의 세기(I)는 파장이 짧을수록 증가($1/\lambda^4$)한다. 따라서 청색광(450 nm)은 적색광(700 nm)보다 $(700/450)^4$ 인 5.9배 강하게 산란하게 되며, 이러한 이유로 푸른색의 하

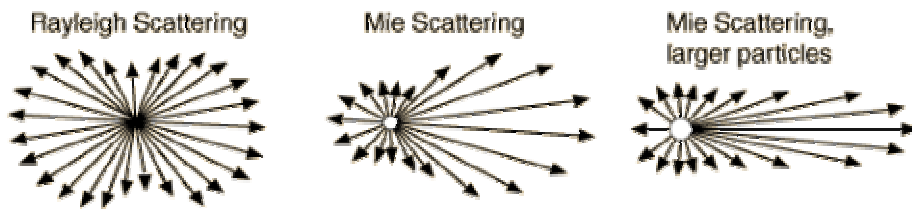


■ 청색광의 산란과 대기내 흡수로 황적색의 노을 발생

늘을 보게 된다. 해너미 때 붉은 노을이 지는것은 태양의 고도가 낮아져서 원거리에서 청색광이 먼저 산란하여 대기중에 흡수되어 버리고 근거리까지 오는 적색광이 관찰자 근처에서 산란하게 되어, 붉은

색의 노을을 보게 된다. 먼산이 가까운 산보다 흐리게 보이는 것도 멀리서 산란되어 오는 빛이 대기중에 흡수되기 때문에 나타나는 현상이다.

레일리 산란이 0.1~1 nm의 입자(기체 분자)에 의한 것이라면 이보다 더 큰 입자에 의해서도 산란이 발생할 수 있다. 즉 0.01~1 μ m 크기를 지닌 에어로졸과 같은 미세입자에 의한 미(Gustav Mie,



[레일리 산란과 미 산란의 차이]

1869-1957) 산란이 발생한다. 레일리 산란은 파장에 따른 산란강도가 차이가 나지만 미 산란은 파장에 크게 영향을 받지 않는다. 입자가 클수록 산란강도가 커지며, 스모그 발생시 미세입자들에 의한 황색 산란을 나타내는 이유가 된다. 구름사이의 틈으로 쏟아지는 틈새빛살(crepuscular rays)도 미 산란의 효과이다. 구름이 흰색으로 보이는 것도 산란의 요인으로, 구름내 물방울(10~100 μ m)이 커서 발생하는 기하(geometric) 산란에 의한 백색을 보인다.

■ 등장인물 살펴보기



스티븐 호킹(Stephen Hawking, 1942-)

영국의 우주물리학자이다. 루게릭병(근위축증)에도 불구하고 특이점 정리, 블랙홀 증발, 양자우주론 등 혁명적인 이론을 제시하였다. 그는 블랙홀을 모든 물체가 빨려 들어가서 검게 보이는 것 아닌, 빛보다 빠른 입자를 방출하며 뜨거운 물체처럼 빛을 발한다고 하였다.



조셉 프라운호퍼(Joseph Fraunhofer, 1787-1826)

독일의 물리학자이다. 광학기기의 개량으로 광학연구에 큰 업적을 남겼으며, 색지움렌즈 연구중 태양 스펙트럼 속에서 많은 암선을 발견하였다. 다른 천체의 스펙트럼 연구도 계속하여 스펙트럼분석학의 기초를 이루었다. 빛의 파장 산출 등의 업적을 이루었다.



구스타브 키르히호프(Gustav Kirchhoff, 1824-1887)

독일의 물리학자이다. 전기회로, 분광학, 흑체복사 등의 분야에 공헌하였다. 1862년 흑체라는 말을 처음 만들어냈으며 물리학, 전기학, 열역학 분야에 기여하였다. 태양의 스펙트럼을 통해 태양의 화학적 조성을 연구하는 과정에서 세슘(Cs)과 루비듐(Rb)을 발견하였다.



피에르 드 페르마(Pierre de Fermat, 1601-1665)

프랑스의 천재 아마추어 수학자이다. 데카르트와 함께 17세기 전반기의 주요 수학자로 불리우며, 페르마의 마지막 정리를 남겨 300년간 미해결 문제로 남아 있다가 1994년에 와일스(Anderew Wiles, 1953-)에 의해 증명되었다. 빛의 최단경로에 관한 페르마의 원리도 발표하였다.



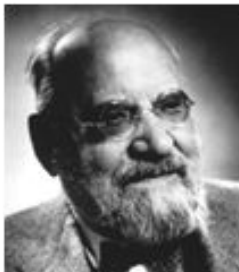
빌러브로어트 스넬리우스(Willebrord Snellius, 1580-1626)

네덜란드의 천문학자, 수학자, 물리학자이다. 아버지의 대를 이어 레이덴 대학 교수로 재직 하였다. 굴절의 법칙을 발견하였으며, 프랑스에서는 데카르트의 법칙 또는 스넬-데카르트 법칙으로 불린다. 또한 앞서 삼각 측량 원리를 이용하여 지구의 크기를 측정하였다.



존 레일리(John Rayleigh, 1842-1919)

영국의 물리학자이다. 하늘이 파란이유를 설명하는 레일리산란에 관한 이론을 정립하였고, 음향학, 탄성파, 액체 등 고전적인 연구와 함께 양자론 이전의 열복사 이론을 세웠다. 아르곤을 발견하여 1904년 노벨 물리학상을 수상하였다. 지진의 표면파인 레일리파도 발견하였다.



구스타브 미(Gustav Mie, 1869-1957)

독일의 물리학자이다. 균일한 유전체에 의한 전자기파의 산란에 관한 연구를 통해, 1902년 입자의 광산란인 미 산란이론을 발표하였다. 이는 상대성원리에 중요한 기여를 하게 되었다. 측정단위에도 관심을 가져서 전압, 전류, 쿨롱, 초의 체계(VACS-system)도 완성하였다.