

박테리아가 미래의 에너지 자원이 될 수 있을까?

박종민

아시아태평양이론물리센터

apctp

asia pacific center for
theoretical physics

Junior Research Group

Thermodynamics of microscopic
nonequilibrium systems

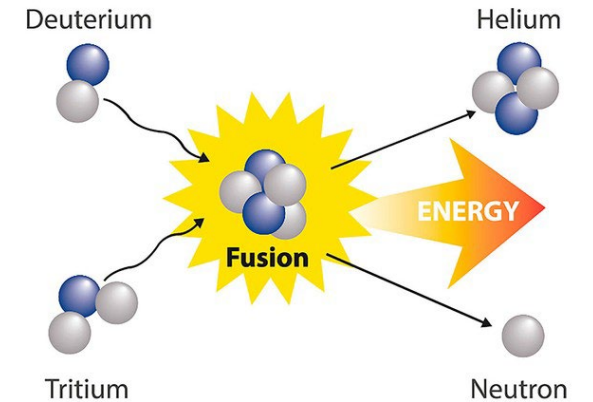
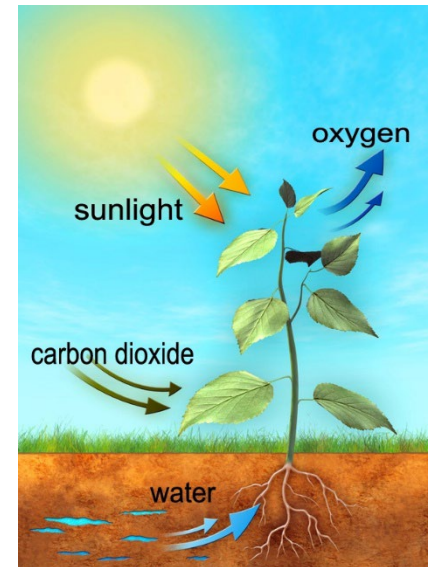
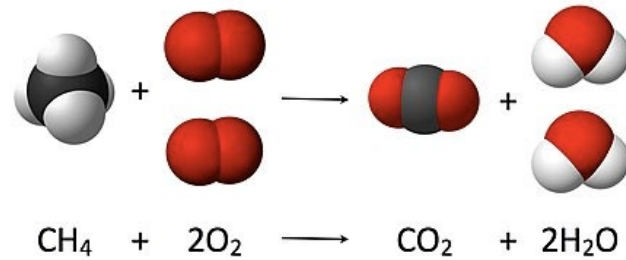
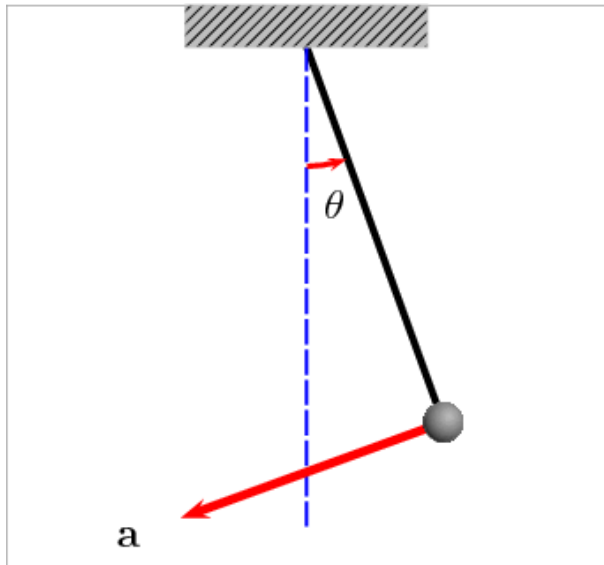
열역학(thermodynamics)

가장 유명한 물리공식

“에너지(energy)”

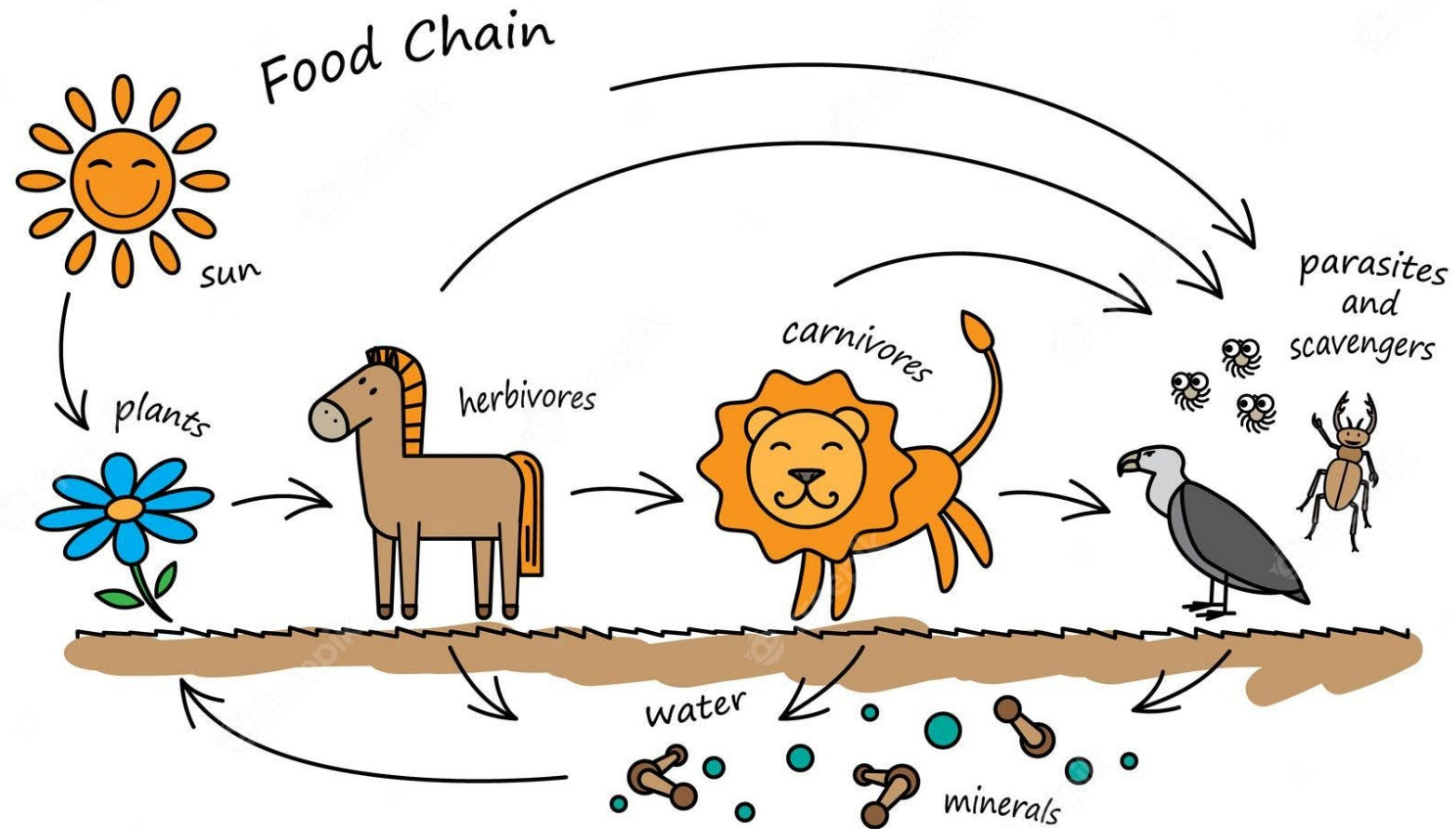
$$E = mc^2$$

에너지 보존 법칙

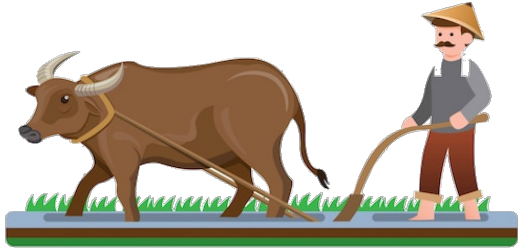


열역학(thermodynamics)

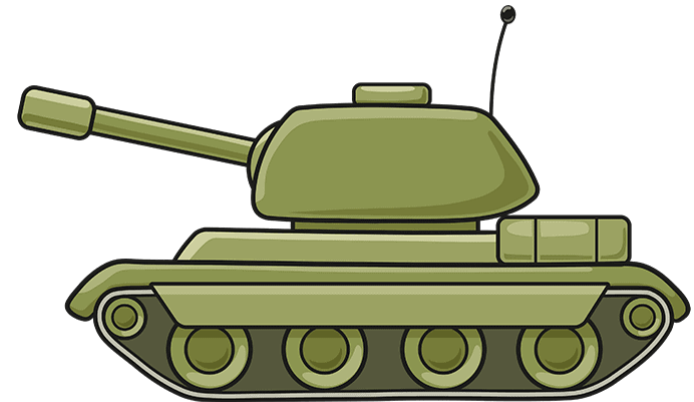
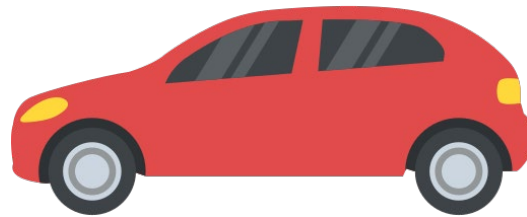
생명체란?



열역학(thermodynamics)

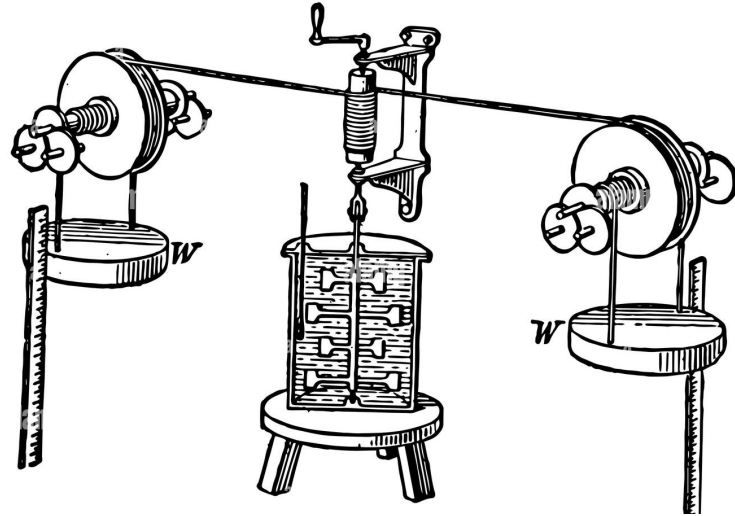


산업혁명

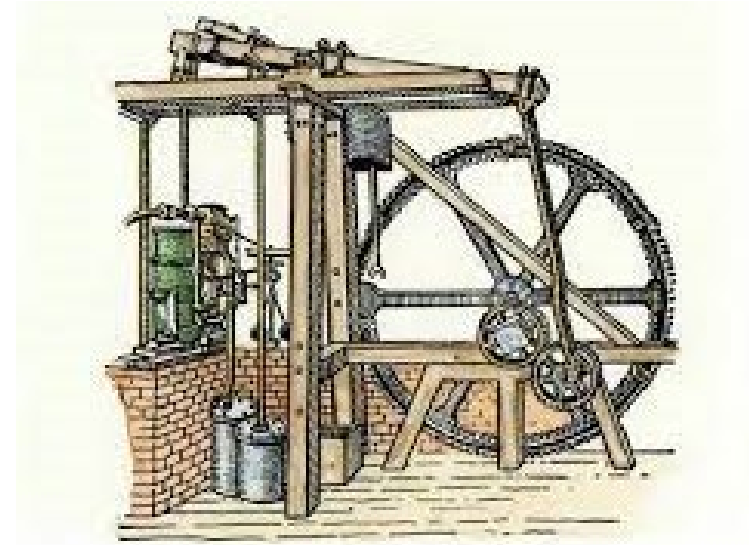


열역학(thermodynamics)

줄(Joule)의 실험 - "열은 에너지다."



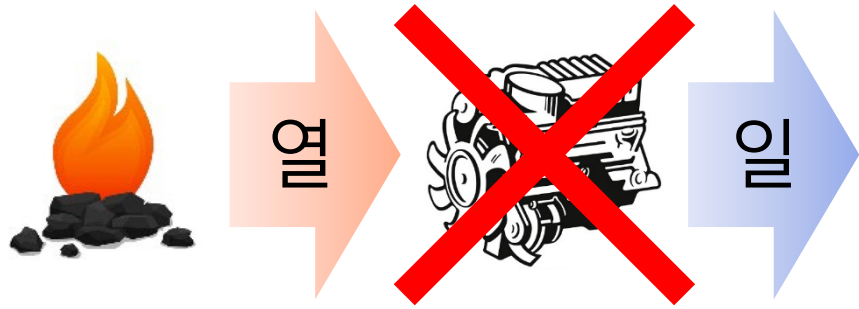
와트(Watt)의 증기기관 - 열기관



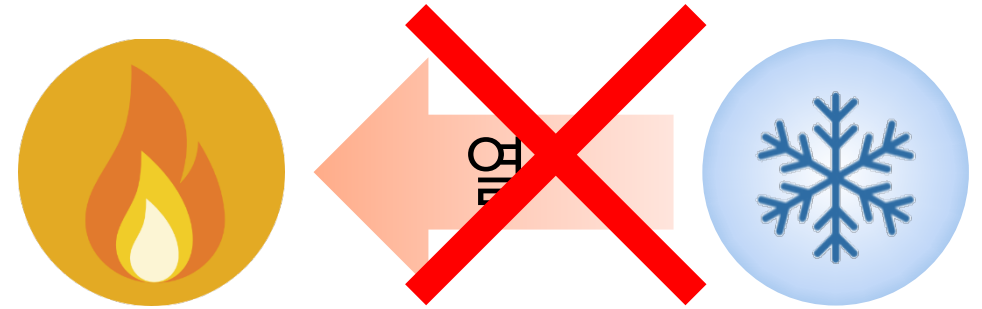
어떻게 해야 가장 **효율**이 좋은 열기관을 만들 수 있을까?

열역학(thermodynamics)

켈빈(Kevin)-플랑크(Planck) 서술



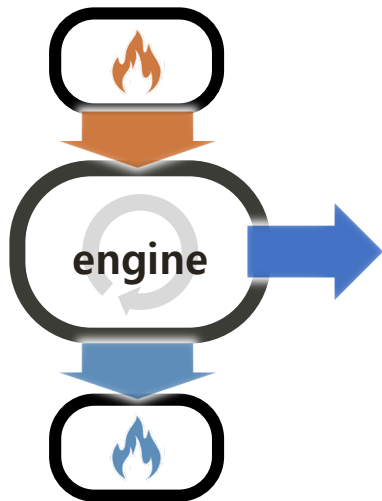
클라우지우스(Clausius) 서술



카르노(Carnot) 서술

“모든 열기관의 열효율은 카르노 효율보다 높을 수 없다.”

$$= 1 - \frac{\text{낮은 온도}}{\text{높은 온도}}$$



열역학 제 2법칙

“엔트로피 생산(entropy production)은 감소할 수 없다.”

열역학(thermodynamics)

열역학 제 1법칙

“열은 에너지다.”

열역학 제 2법칙

“자연에는 안 되는 게 참 많다.”

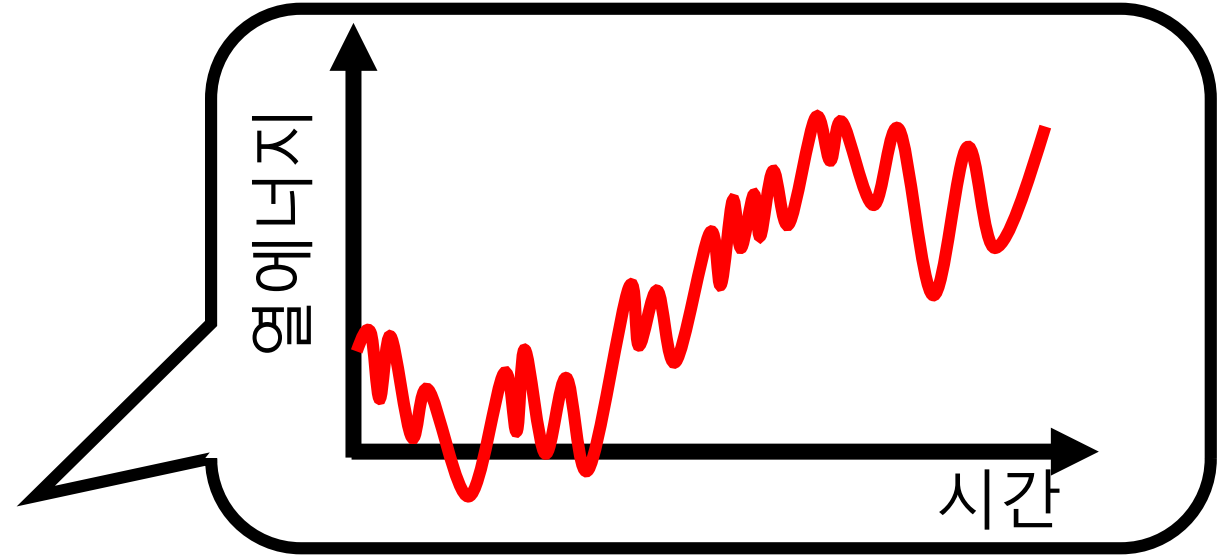
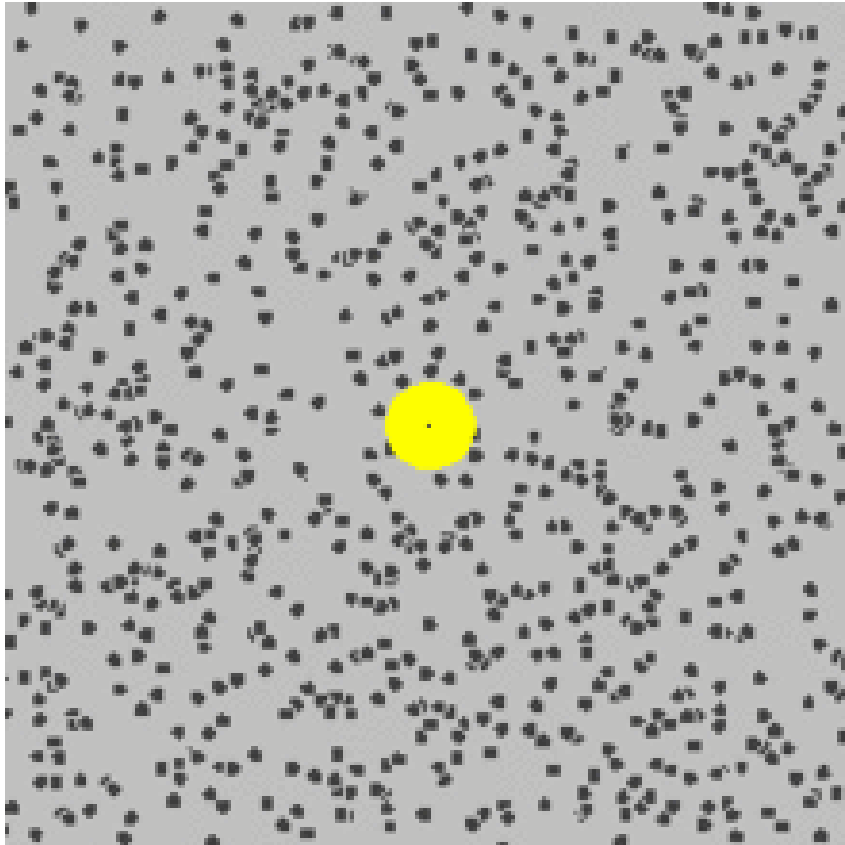
“열을 다른 형태의 에너지로 바꾸는 것은 어렵다.”

효율이 높다 = 열 소산이 적다 = 엔트로피 생산이 적다

고전적 열역학의 한계

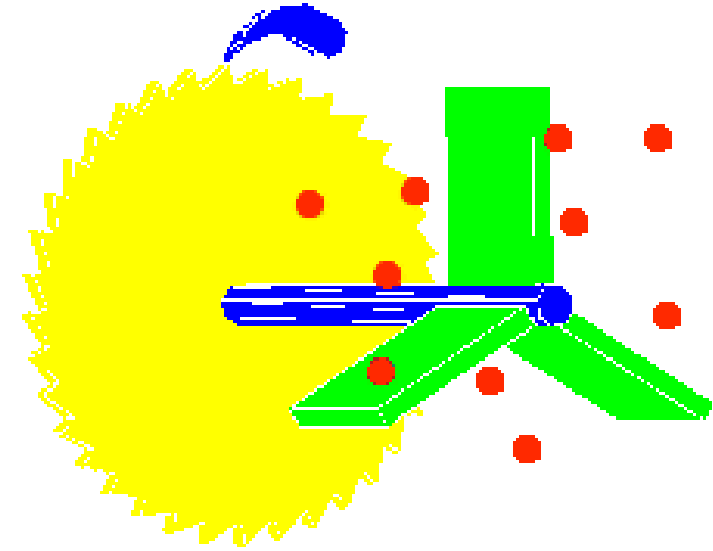
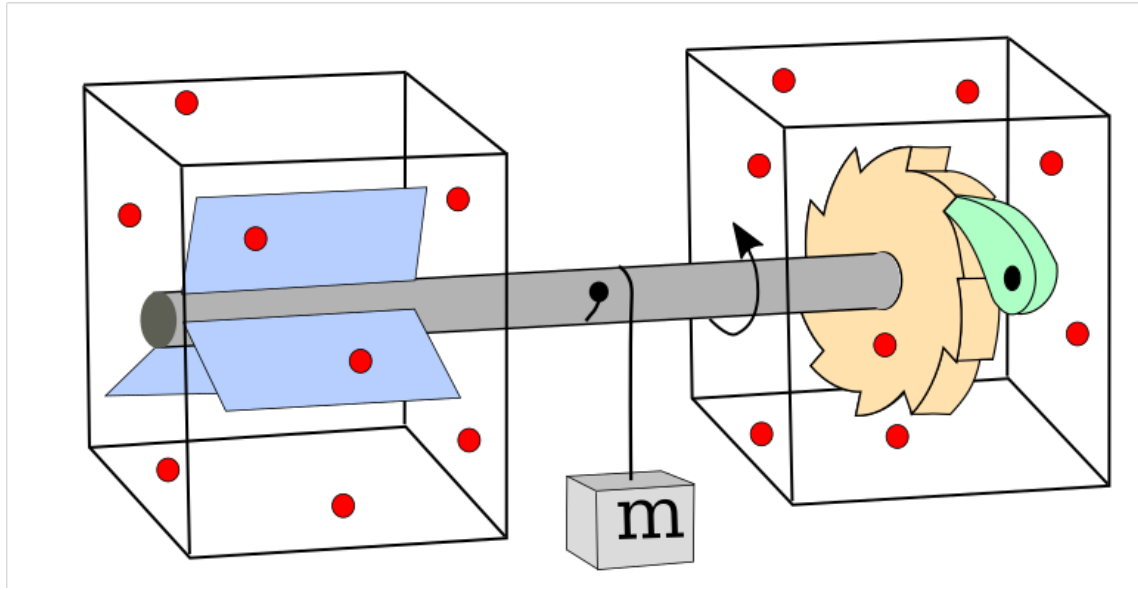
거시계에만 적용이 가능하다.

브라운 운동(Brownian motion)



미시적 열기관

파인만(Feynman)-스몰루호프스키(Smoluchowski) 래칫



래칫이 (평균적으로) 일을 하기 위한 조건:

1. 형태의 비대칭
2. 온도차

확률적 열역학(stochastic thermodynamics)

확률적 열역학 제 2법칙

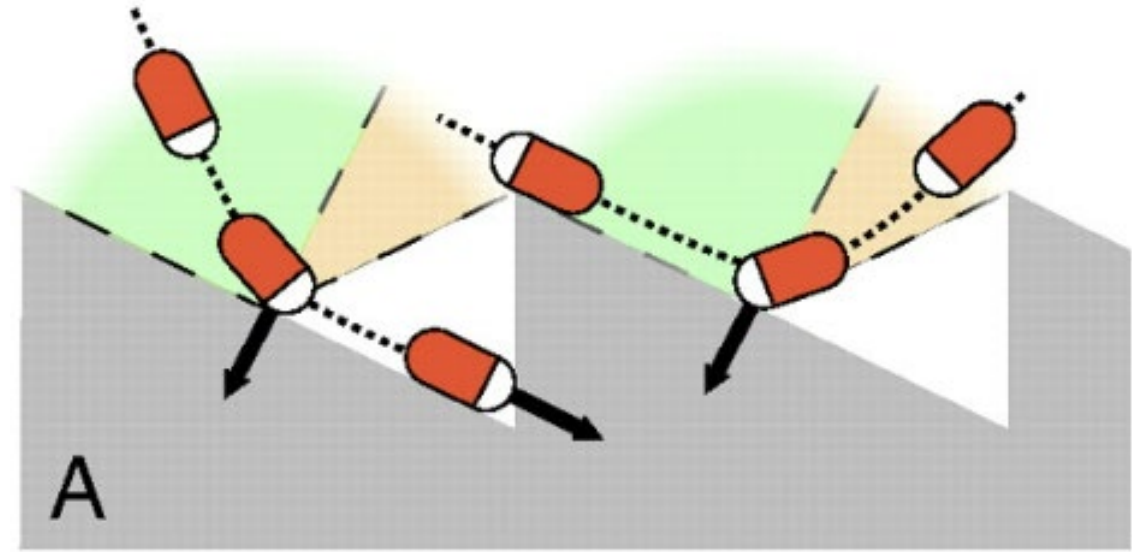
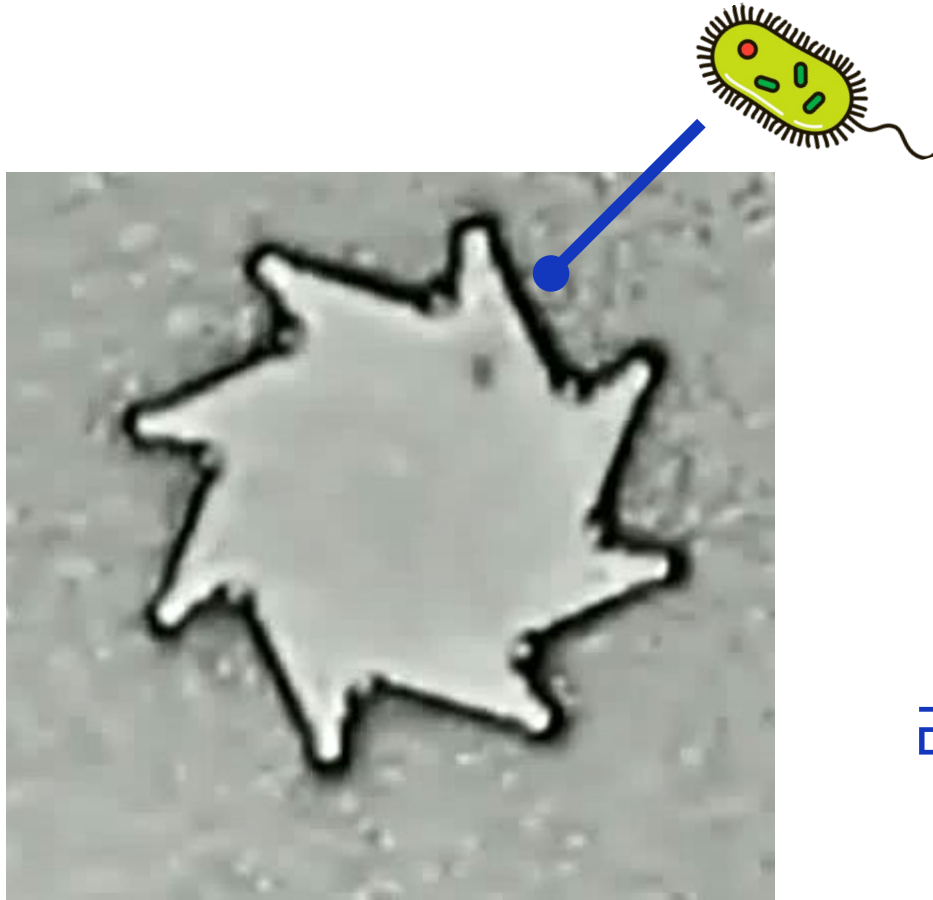
확률적으로 엔트로피 생산은 줄어 들 수도 있다.

평균적으로 엔트로피 생산은 줄어 들 수 없다.

미시적 열기관의 거시적 열효율

$$\text{거시적 열효율} = \frac{\text{생산하는 일의 평균}}{\text{들어오는 열의 평균}} \leq \text{카르노 효율}$$

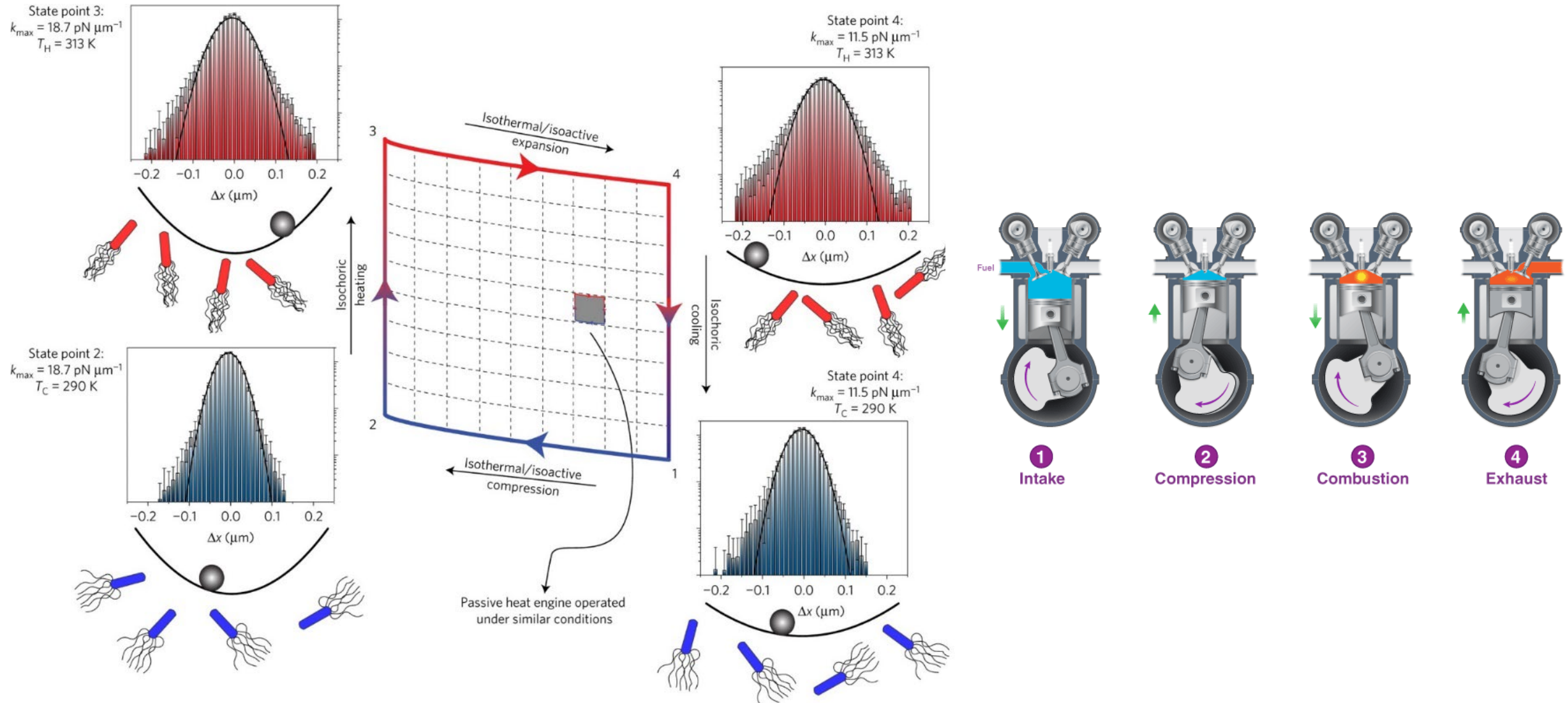
박테리아 래칫 모터



래칫이 (평균적으로) 일을 하기 위한 조건:

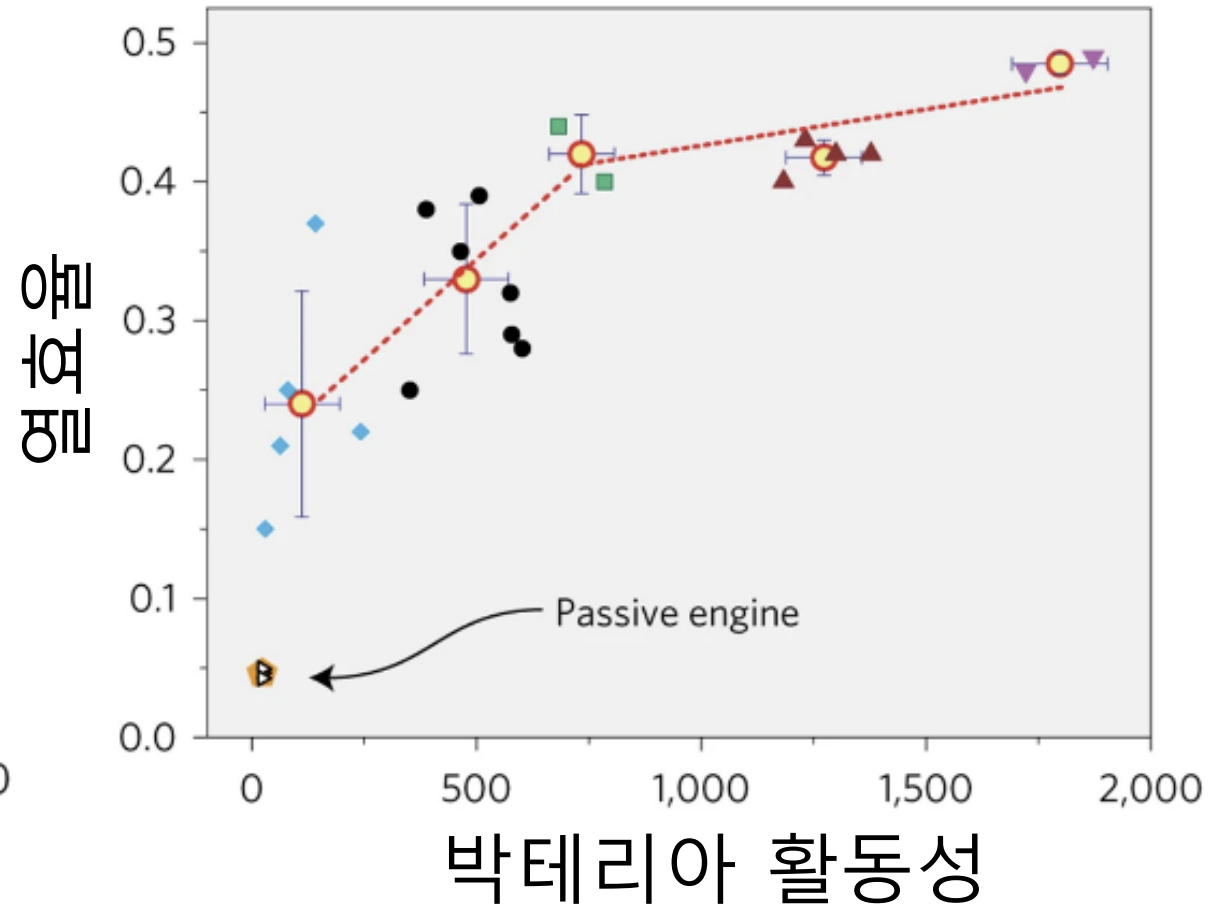
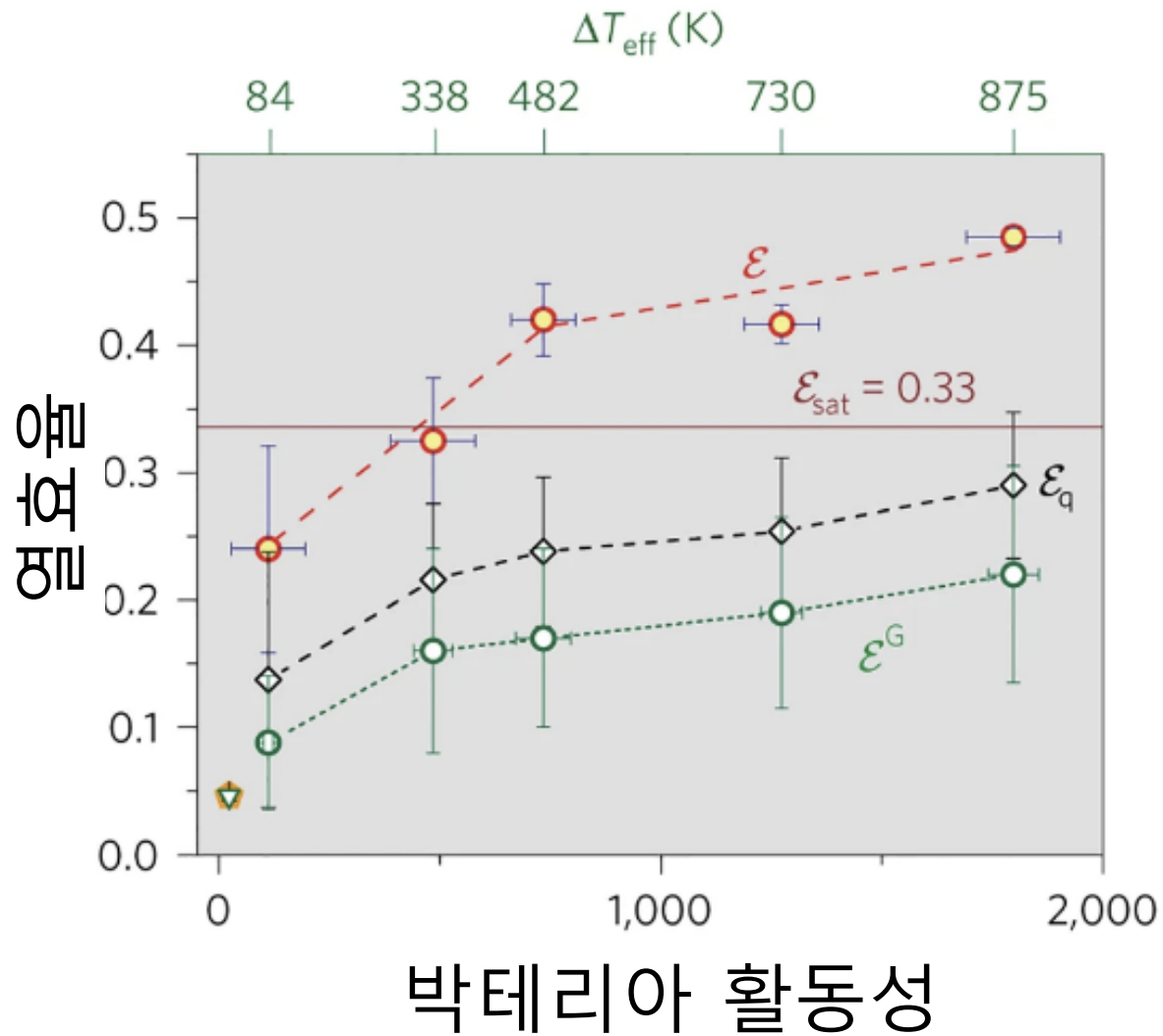
1. 형태의 비대칭
2. 온도차 비평형

박테리아 환경과 상호작용하는 미시적 열기관



["A micrometer-sized heat engine operating between bacterial reservoirs", S. Krishnamurthy et. al., Nat. Phys. **12**, 1134 (2016)]

박테리아 환경과 상호작용하는 미시적 열기관



["A micrometer-sized heat engine operating between bacterial reservoirs", S. Krishnamurthy et. al., Nat. Phys. **12**, 1134 (2016)]

박테리아 환경과 상호작용하는 미시적 열기관

질문들

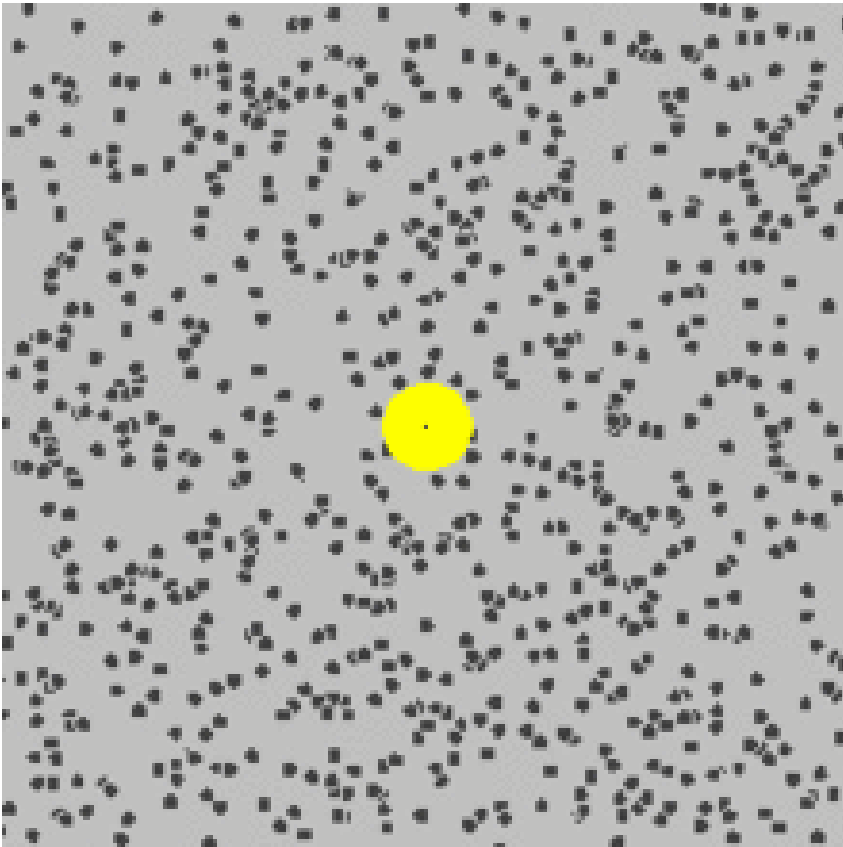
어떻게 해야 박테리아가 이로운 효과를 줄까?

박테리아 기관의 효율의 한계는 무엇일까?

혹시 카르노 효율을 넘을 수 있을까?

이론적 모형: 박테리아 환경에서의 운동

브라운 운동(Brownian motion)

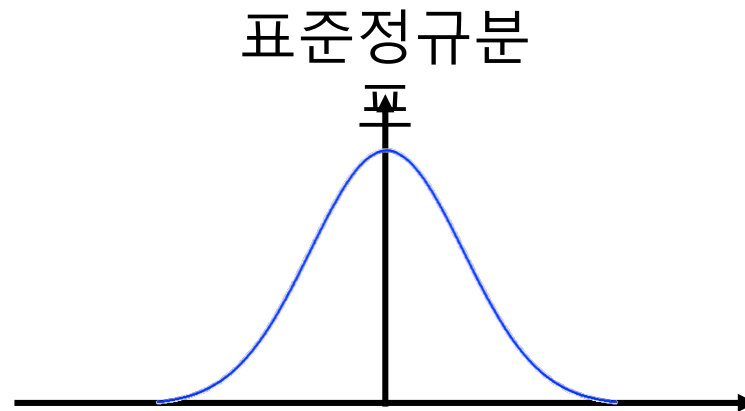


랑쥬벵(Langevin) 방정식
= 뉴턴 역학($F = ma$) + 난수

$$m\dot{v}(t) = -\gamma v(t) + \sqrt{2\gamma k_B T} \xi(t)$$

ma 저항력 열적 잡음

열적 잡음(thermal noise)



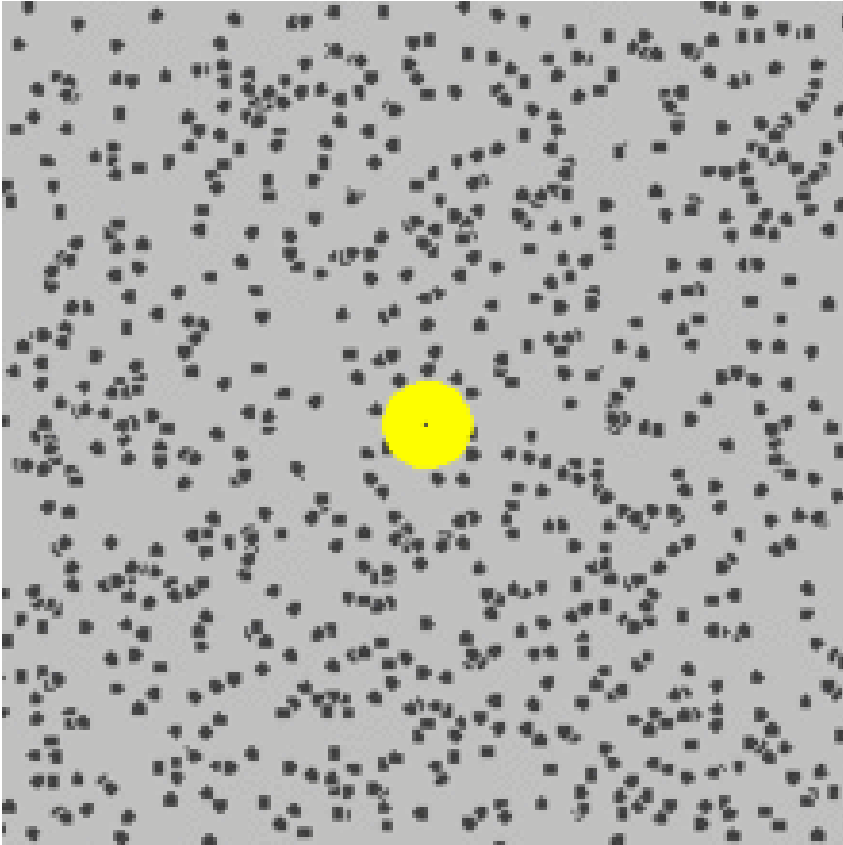
백색 잡음

If $t_1 \neq t_2$

$$\langle \xi(t_1) \xi(t_2) \rangle = 0$$

이론적 모형: 박테리아 환경에서의 운동

브라운 운동(Brownian motion)



랑쥬벵(Langevin) 방정식

= 뉴턴 역학($F = ma$) + 난수

$$m\dot{v}(t) = -\gamma v(t) + \sqrt{2\gamma k_B T} \xi(t)$$

ma 저항력 열적 잡음

정상 확산(normal diffusion)

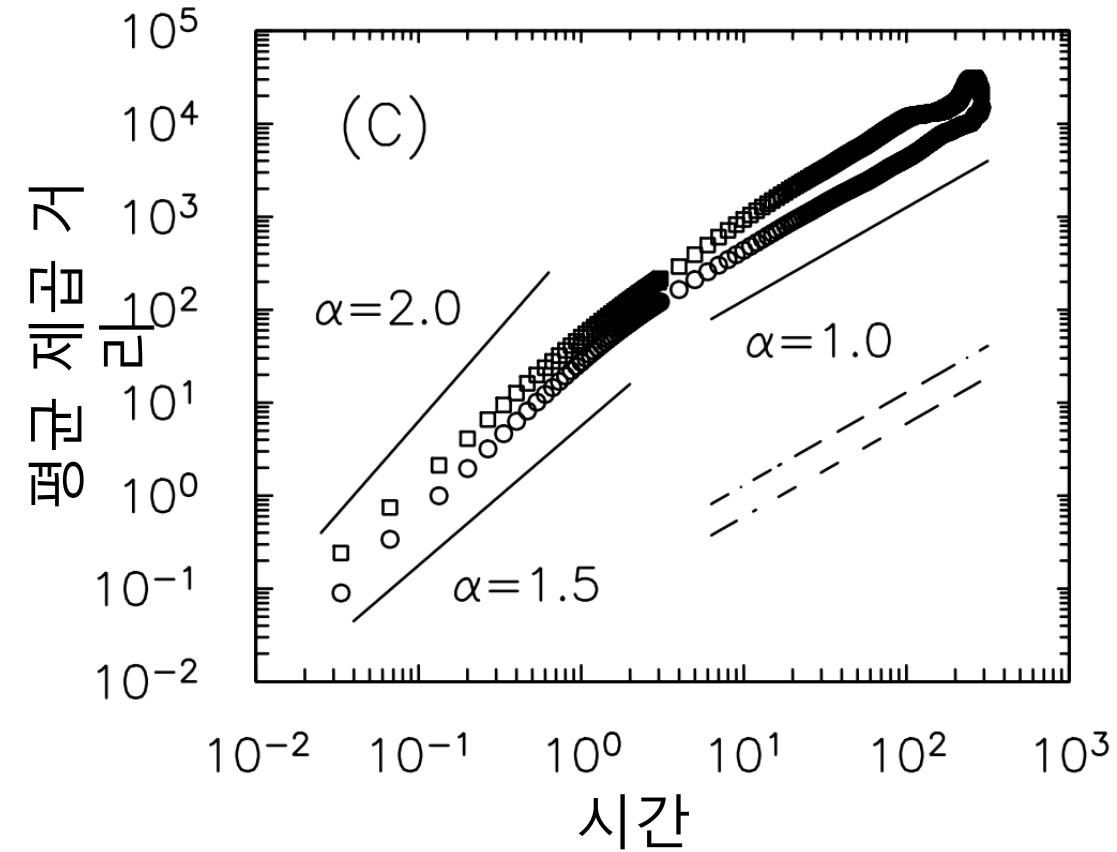
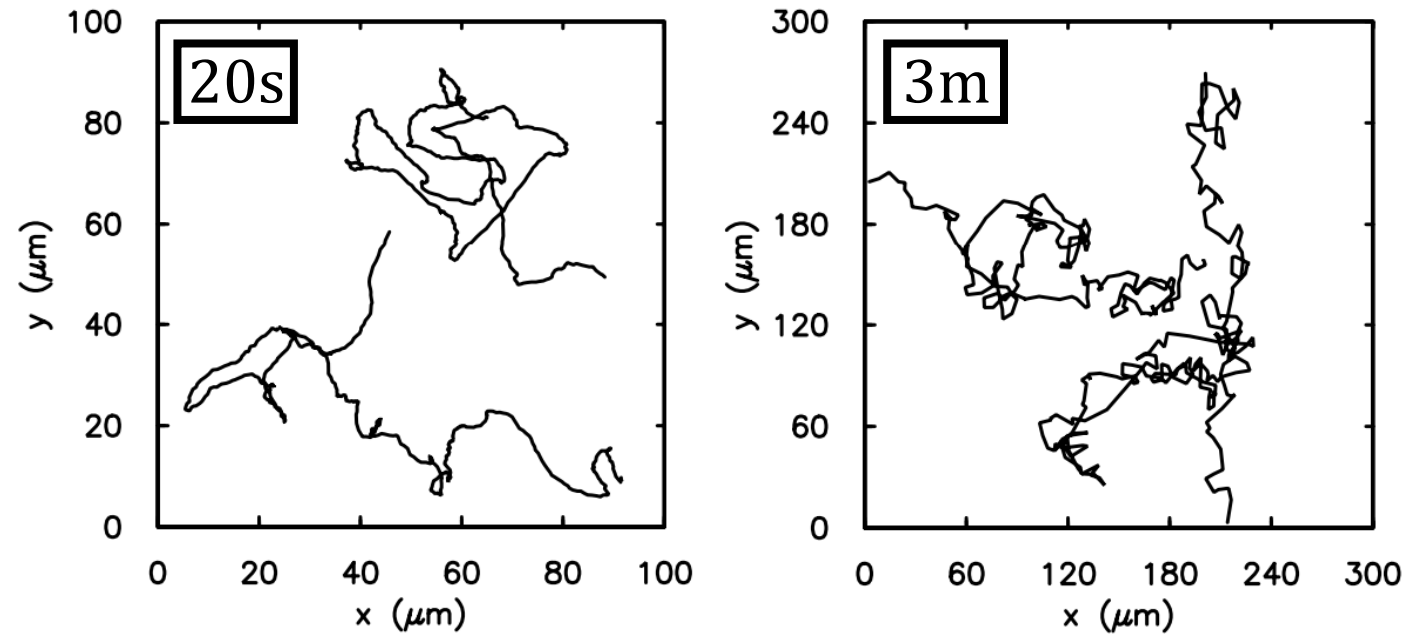
평균 제곱 거리(Mean squared displacement; MSD)

$$\langle (r(t) - r(0))^2 \rangle \propto t$$

이론적 모형: 박테리아 환경에서의 운동

박테리아 환경에서 브라운 운동(Brownian motion)

예) $20\mu\text{m}$ 크기의 구슬의 운동



["Particle Diffusion in a Quasi-Two-Dimensional Bacterial Bath", X.-L. Wu *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 3017 (2000)]

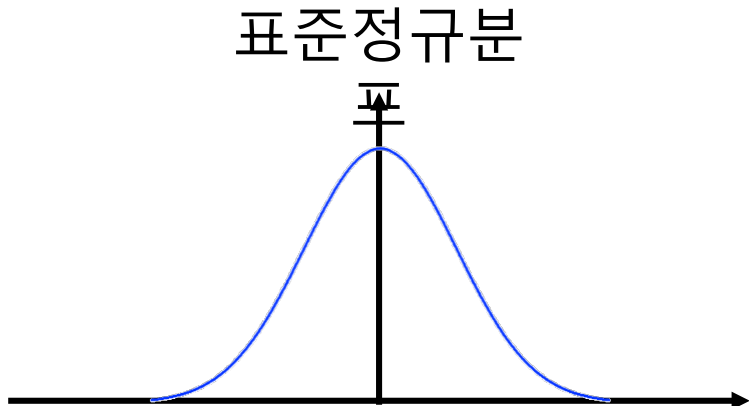
이론적 모형: 박테리아 환경에서의 운동

활성 온슈타인-울렌벡 과정(active Ornstein-Uhlenbeck process; AOUP)

$$m\dot{v}(t) = -\gamma v(t) + \sqrt{2D}\eta(t)$$

\nearrow ma \nearrow 저항력 \nearrow 활성 잡음

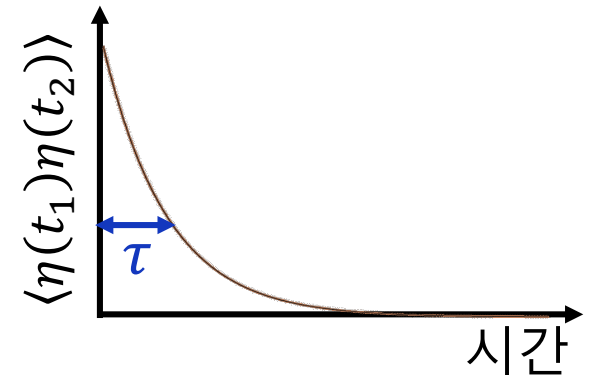
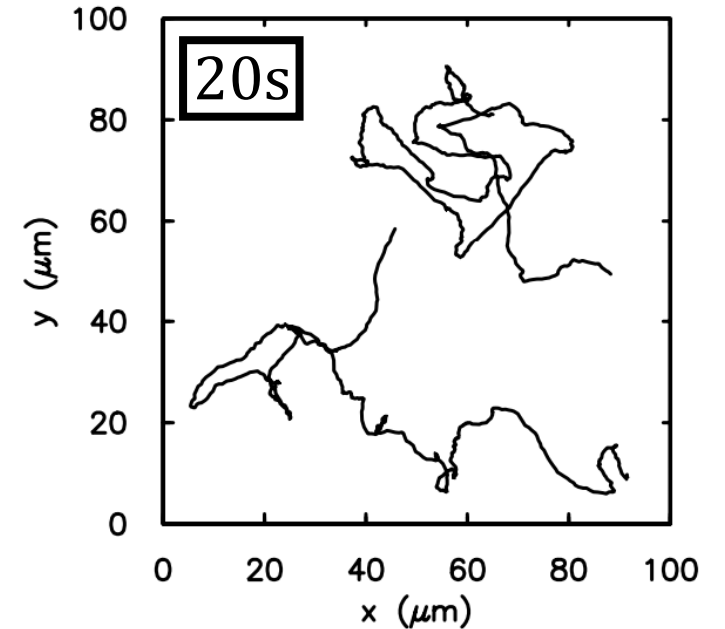
활성 잡음(active noise)



유색 잡음

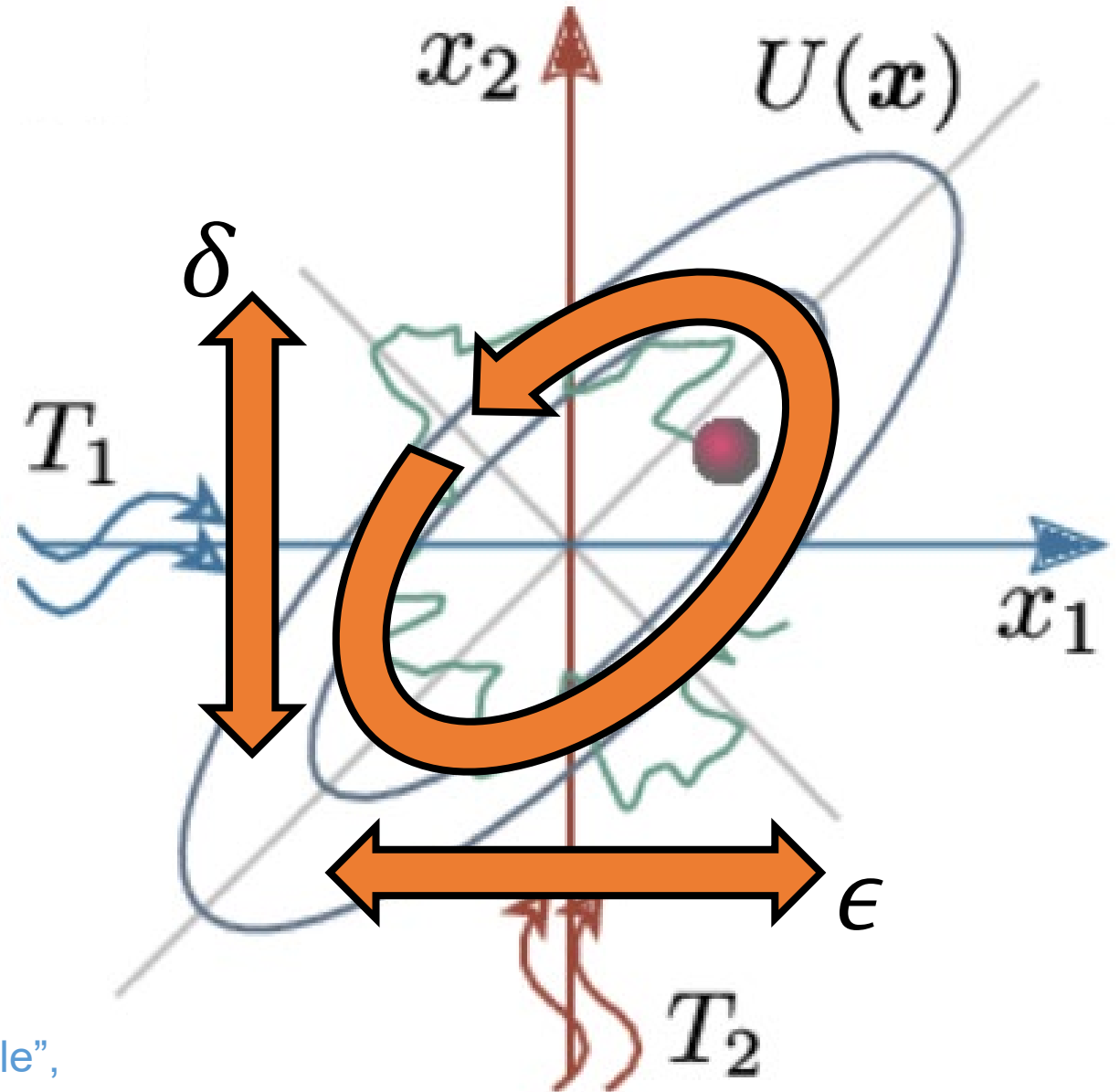
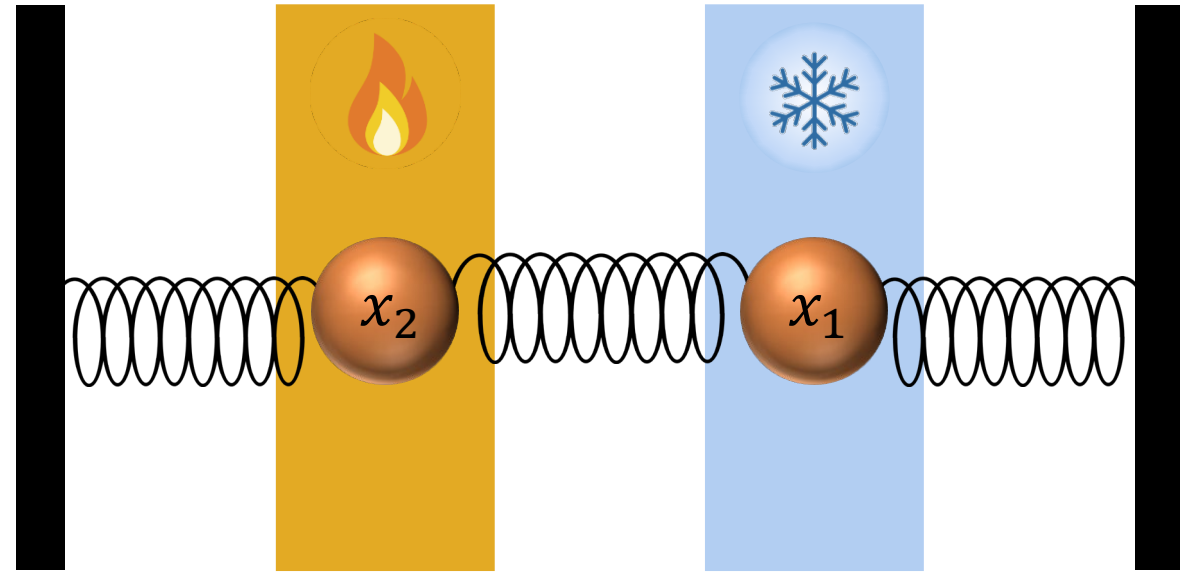
$$\langle \eta(t_1)\eta(t_2) \rangle = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{|t_1-t_2|}{\tau}}$$

\nearrow 지속 시간



이론적 모형: 미시적 열기관

브라운니안 자이레이터

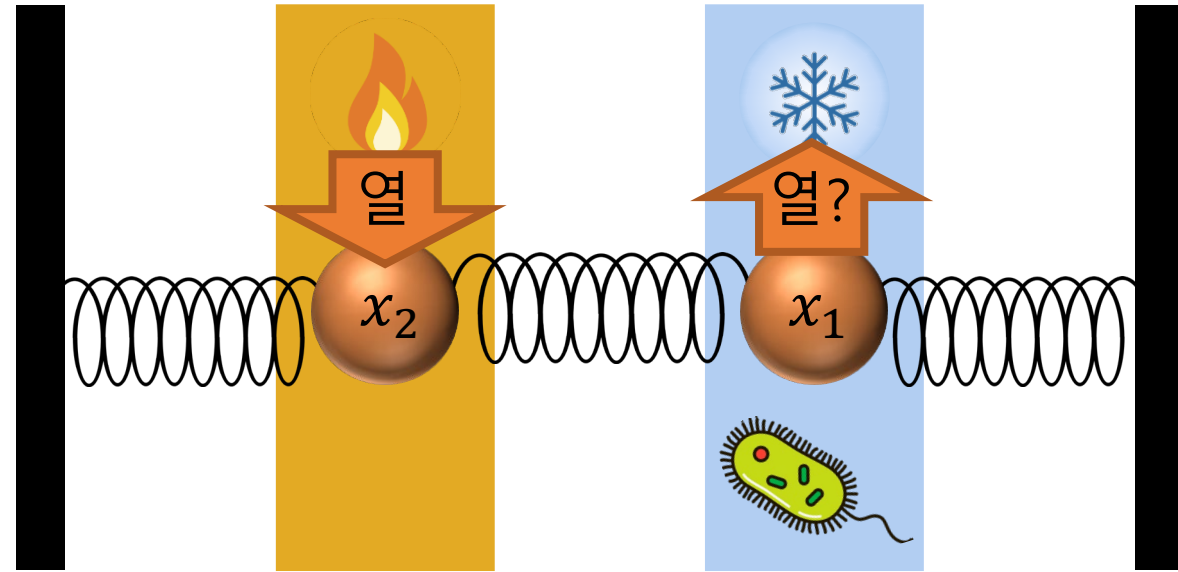


["Brownian Gyration: A Minimal Heat Engine on the Nanoscale",
R. Filliger *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 230602 (2007)]

이론적 모형: 미시적 열기관

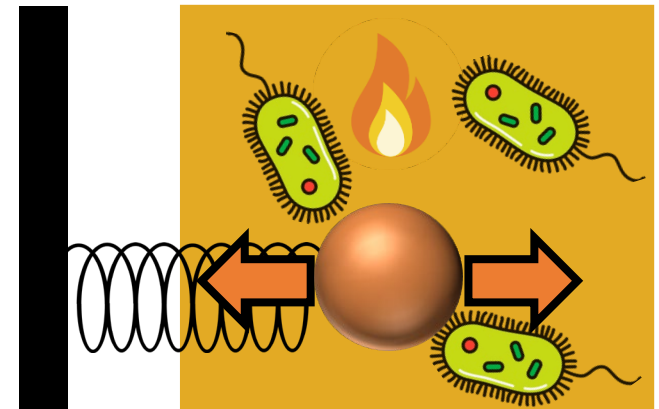
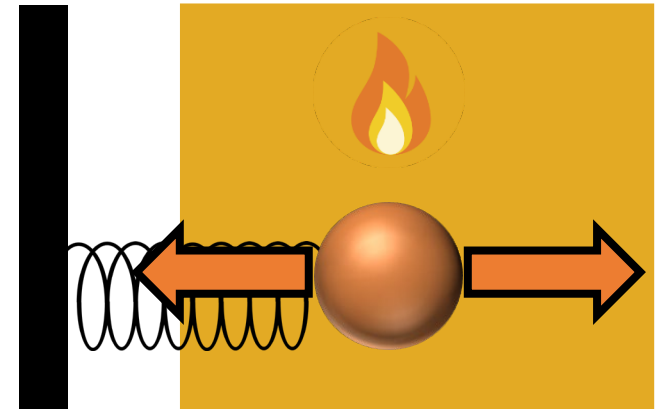
브라우니안 자이레이터

열의 정의 문제

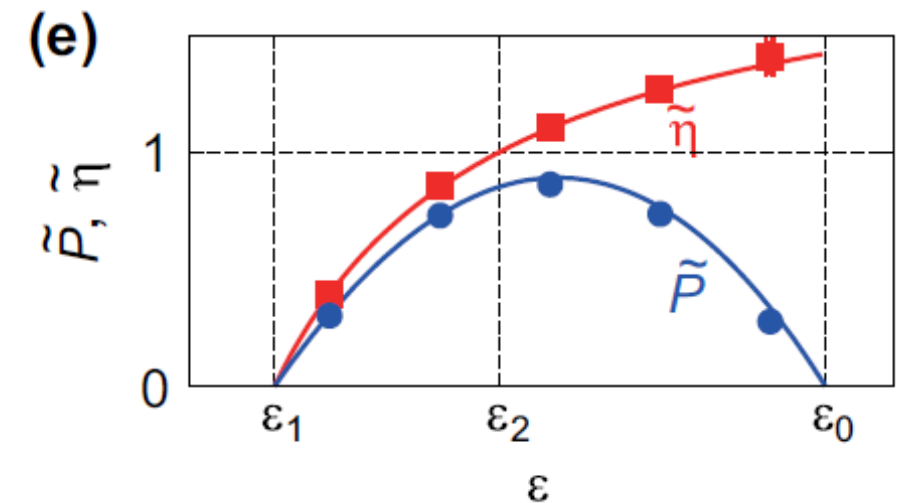
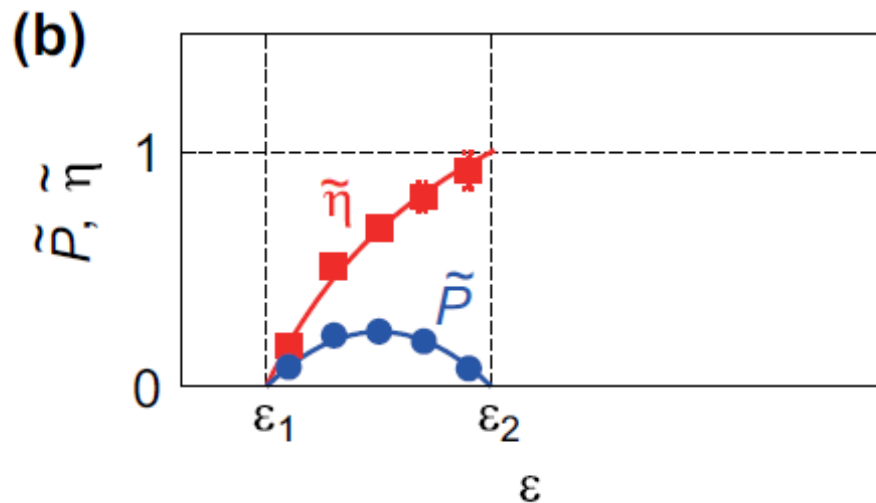
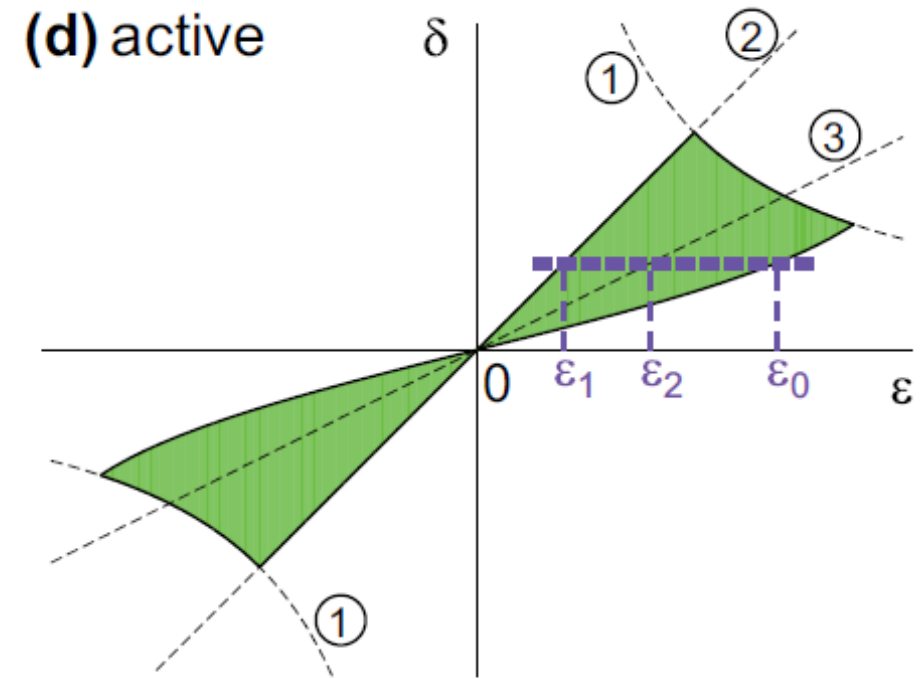
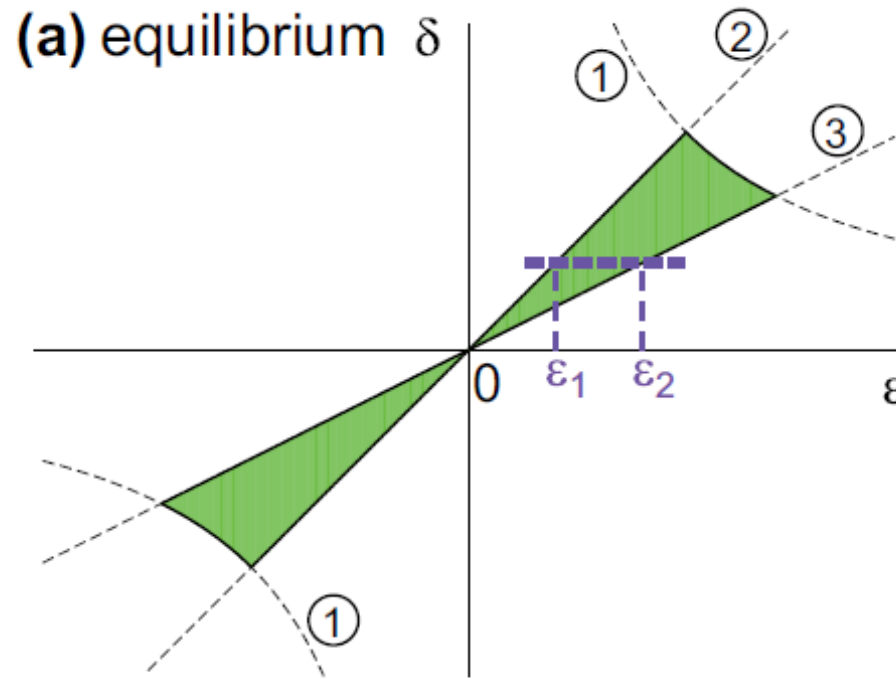
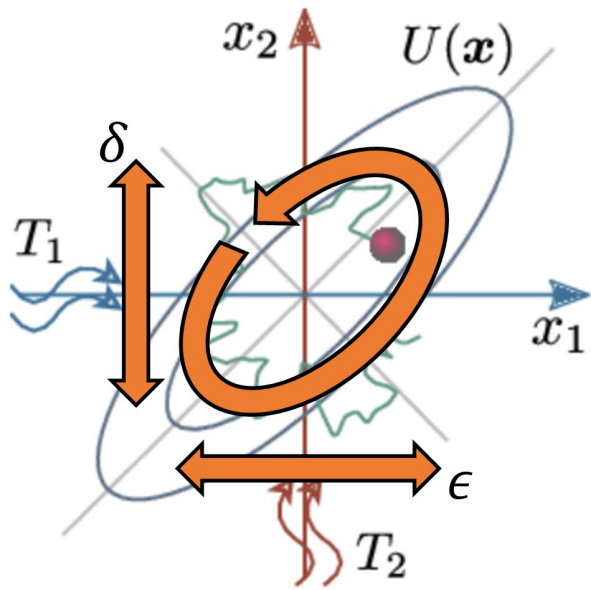


$$\frac{\text{열}}{\text{열}} = \frac{\text{생산하는 일}}{\text{들어오는 열}}$$

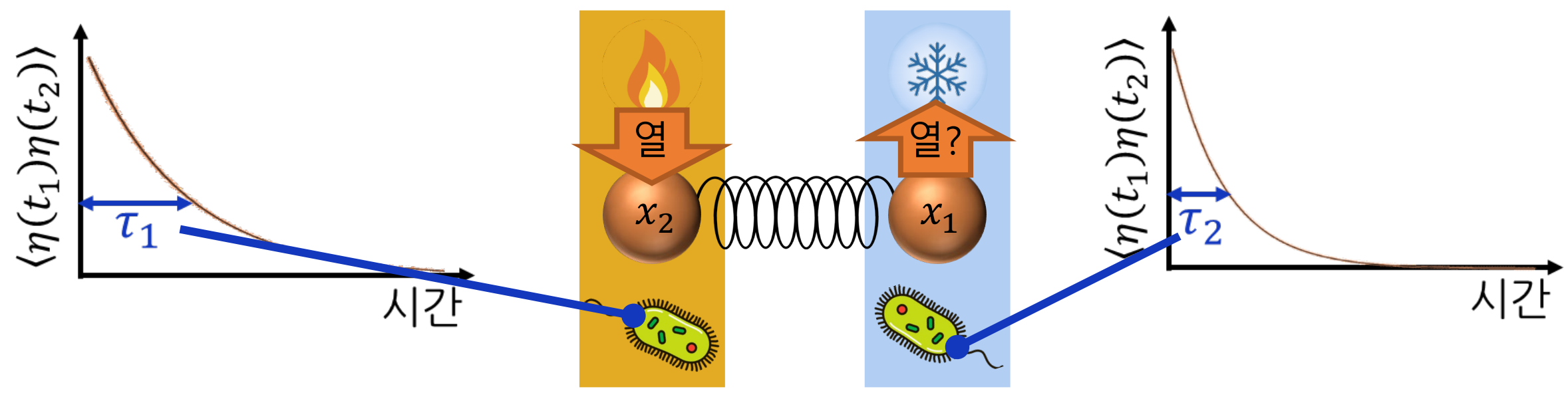
유효 온도



결과



열역학 제 2법칙



$$\text{비가역성} \approx \text{엔트로피} = \frac{Q_2}{T_2} (\eta_c - \eta) + (\tau_2 - \tau_1) \underbrace{\text{어떤 상수}}_{\geq 0} \geq 0$$

결론

특성 시간이 중요하다

- 활성 기관의 성능 / 효율을 높이기 위한 또 다른 조건은 무엇일까?
- 활성 환경에서 들어오는 열은 어떻게 정의할까?
활성 기관의 열효율은 어떻게 정의할까?
- 일반적인 활성 시스템에서의 제 2법칙을 어떻게 표현할까?
- 일반적인 활성 기관의 열효율의 상한은 무엇일까?