

제7강

엔트로피

가역 과정에 대한 클라우지우스의 정리에서부터
출발해 봅시다.

우리는 여기에서 새로운 상태 함수를 정의할 수 있습니다.

$$\oint \frac{\mathrm{d}Q_{rev}}{T} = 0$$

가역 기관에서 위의 양이 0이 된다는 것은,
 $\mathrm{d}Q_{rev}/T$ 가 상태 함수가 된다는 뜻입니다.

$$dS \equiv \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

이 함수를 (열역학적) 엔트로피라고 정의합니다.

$$dS \equiv \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

우리는 앞에서 엔트로피를 미시상태의 경우의 수(볼츠만 엔트로피)로 정의할 수 있다고 했습니다.

나중에 우리는 이 정의들이 어떻게 연관되는 지를 볼 것입니다.

$$dS \equiv \frac{\text{đ}Q_{rev}}{T}$$

그러나 지금 위의 식은 미시 상태를 고려하지 않고
오직 열역학적 양(열과 온도)만으로 정의된 함수입니다.

$$dS \equiv \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

엔트로피는 **가역적** 열 변화로 정의됩니다.
비가역 과정에 대해서는 **비가역 과정과 동등한**
가역 과정의 적분을 통해 정의합니다.

$$\int_A^B \frac{\mathrm{d}Q}{T} \leq \int_A^B \frac{\mathrm{d}Q_{rev}}{T}$$

클라우지우스의 정리에 의해
일반적으로 위의 관계식이 성립합니다.

$$\frac{\dot{d}Q}{T} \leq \frac{\dot{d}Q_{rev}}{T} \equiv dS$$

클라우지우스의 정리에 의해
일반적으로 위의 관계식이 성립합니다.

$$dS \geq 0$$

열적으로 고립된 계에서는 $dQ = 0$ 을 만족합니다.
따라서 다음과 같이 표현됩니다.

$$dS \geq 0$$

열적으로 고립된 가역 과정의 경우에는
위의 식에서 등식이 성립합니다.

열역학 제2법칙
(엔트로피)

$$dS \geq 0$$

$$\text{đ}Q = T dS$$

$$\text{đ}W = -p dV$$

가역 과정의 경우 위와 같다는 것을 이제 알 수 있습니다.

이제 열역학적으로 정의된 엔트로피로부터
에너지에 대한 관계식으로 다시 돌아와봅시다.

$$E = E(S, V)$$

내부 에너지가 S 와 V 의 함수라고 합시다.

$$dE = \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right)_V dS + \left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_S dV$$

내부 에너지는 상태 함수이므로
위와 같이 전미분으로 전개됩니다.

$$T = \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right)_V$$
$$p = - \left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_S$$

따라서 위의 두 관계식을 얻습니다.

$$dE = T dS - p dV$$

따라서 위와 같이 쓸 수 있습니다.

$$dS = \frac{1}{T} dE + \frac{p}{T} dV$$

또는 엔트로피에 대해 위와 같이 정리됩니다.

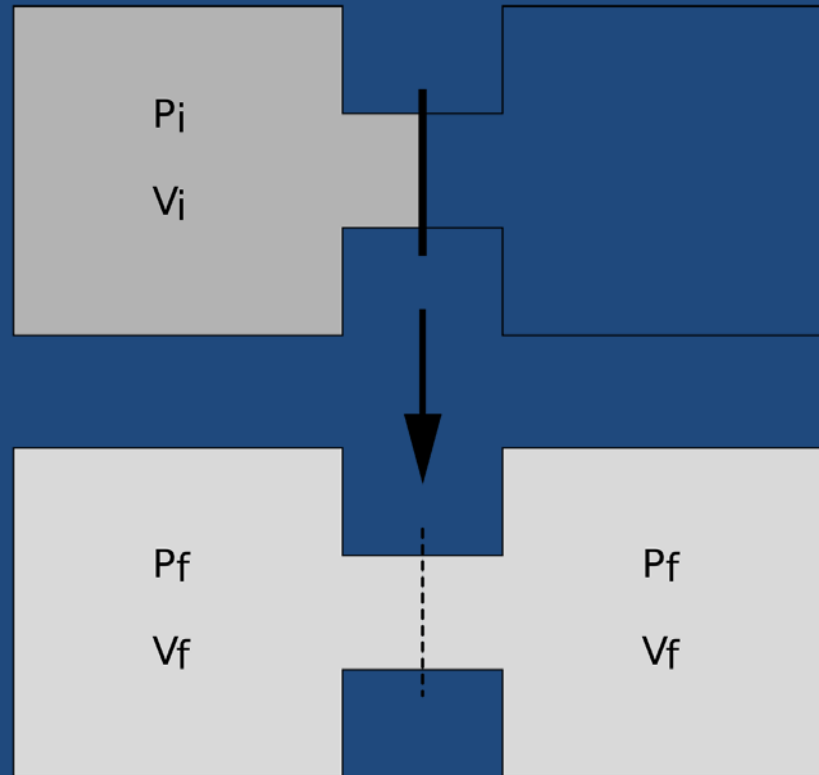
$$\Delta S = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta E + \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) \Delta V$$

따라서 엔트로피의 변화가 없는 평형 상태에서는
온도와 압력이 일정해야 합니다.

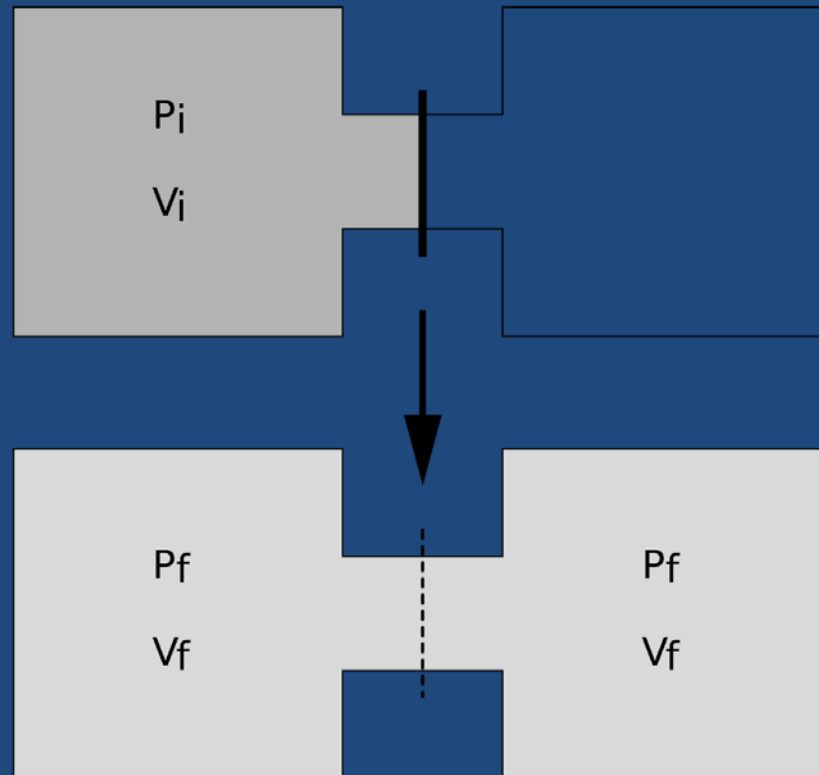
$$\delta Q \leq T dS$$

$$\delta W \geq -p dV$$

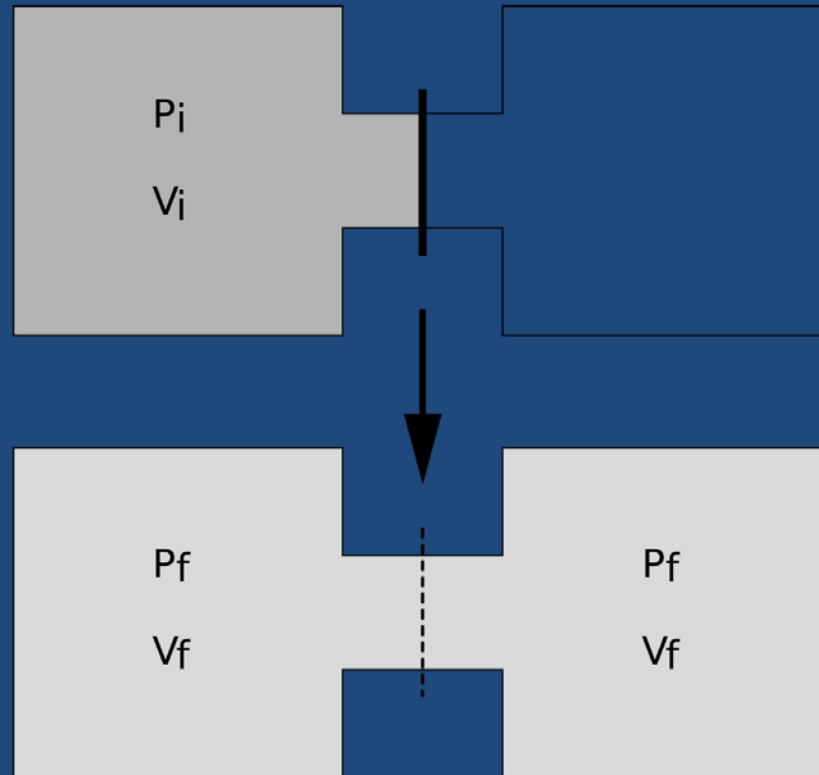
한편, 클라우지우스의 정리로부터,
비가역 과정의 경우는 일반적으로 위의 관계가 성립합니다.



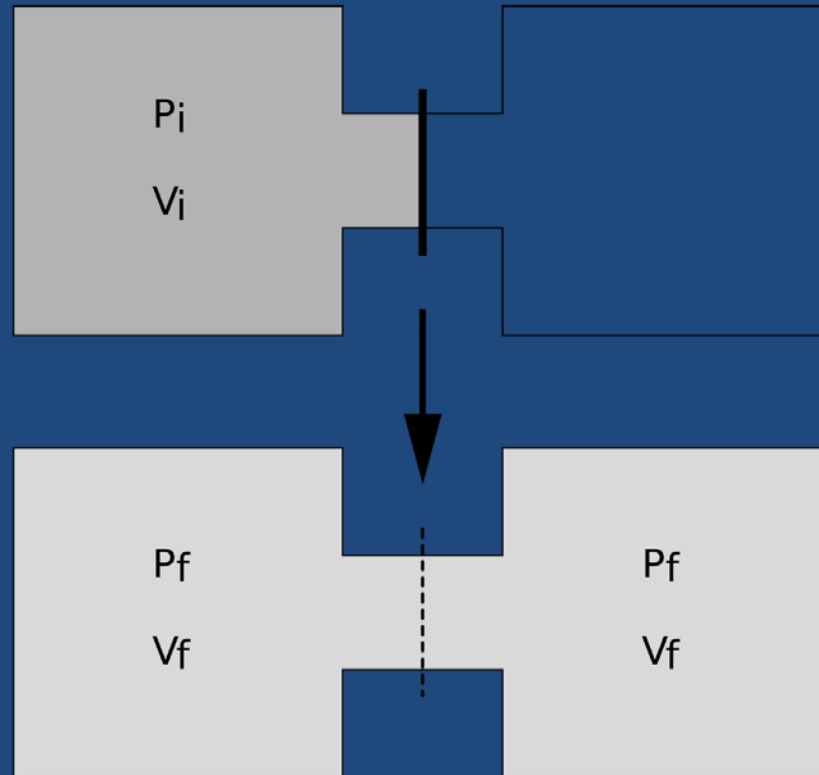
다음과 같은 **줄 Joule 팽창**을 통해
비가역 과정에 대해 좀 더 살펴봅시다.



$V_f = 2V_i$ 라고 하면, 팽창 전에는 $p_i V_i = NkT_i$ 이고,
팽창 후에는 $p_f 2V_i = NkT_f$ 가 됩니다.



이 계는 열적으로 고립되었기 때문에, 내부 에너지가 변하지 않고
따라서 온도가 변하지 않습니다.
그러면 $p_i = 2p_f$ 가 됩니다.



한편 이 줄 팽창과 시작과 끝이 같은 가역 팽창(등온 팽창)을 생각하면
엔트로피의 변화는 $\Delta S = Nk \ln 2$ 가 된다는 것을
확인할 수 있습니다.

$$\delta Q \leq T dS$$

$$\delta W \geq -p dV$$

이 경우 위와 같은 관계가 만족됨을 확인할 수 있습니다.

줄 팽창에서는 $\delta Q = \delta W = dE = dT = 0$ 이지만
엔트로피의 변화 dS 는 0보다 큰 값을 가지게 됩니다.

또한 $TdS = pdV$ 의 관계도 갖게 됩니다.

한 걸음 더 나아가 열역학적으로 정의된 엔트로피로부터
통계적으로 정의된 엔트로피를
연관지어 봅시다.

$$dS = \frac{1}{T} dE + \frac{p}{T} dV$$

위의 관계식과 S 에 대한 전미분을 생각해봅시다.

$$\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_V$$

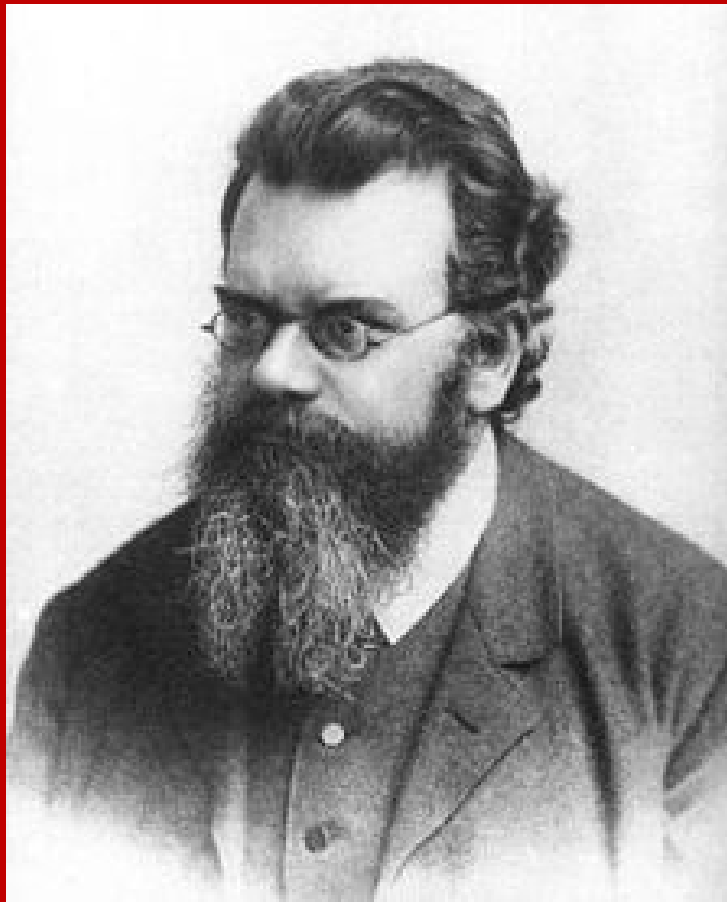
그러면 위의 관계를 연습니다.

$$\frac{1}{T} = \frac{k d \ln \Omega}{dE}$$

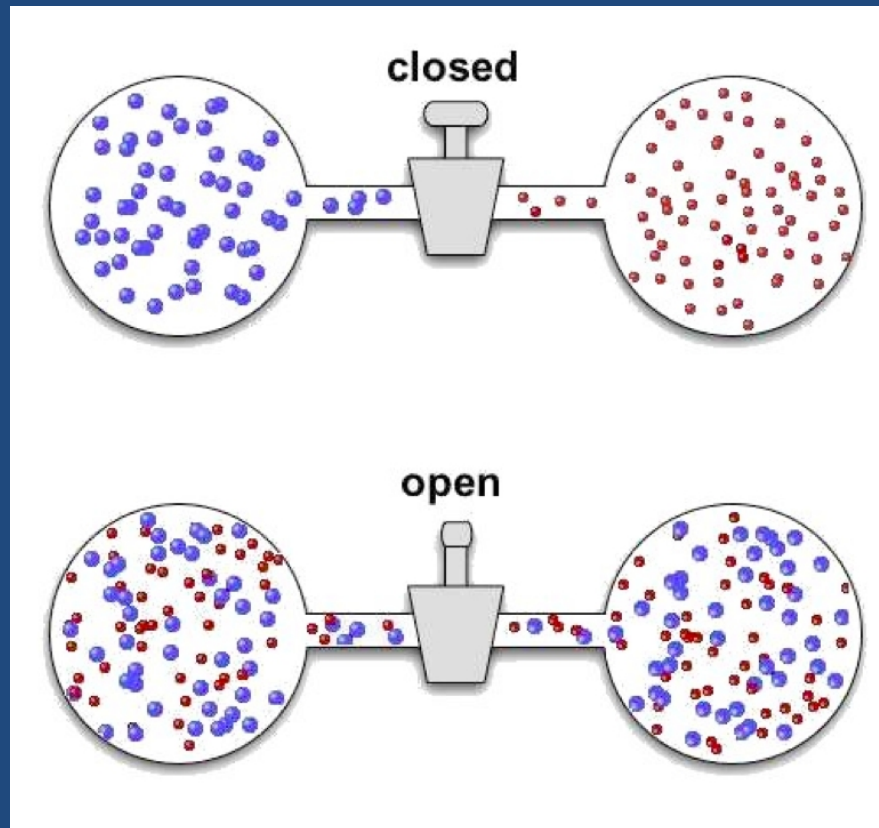
앞에서 구한 경우의 수와의 관계를 고려해봅시다.

$$S = k \ln \Omega$$

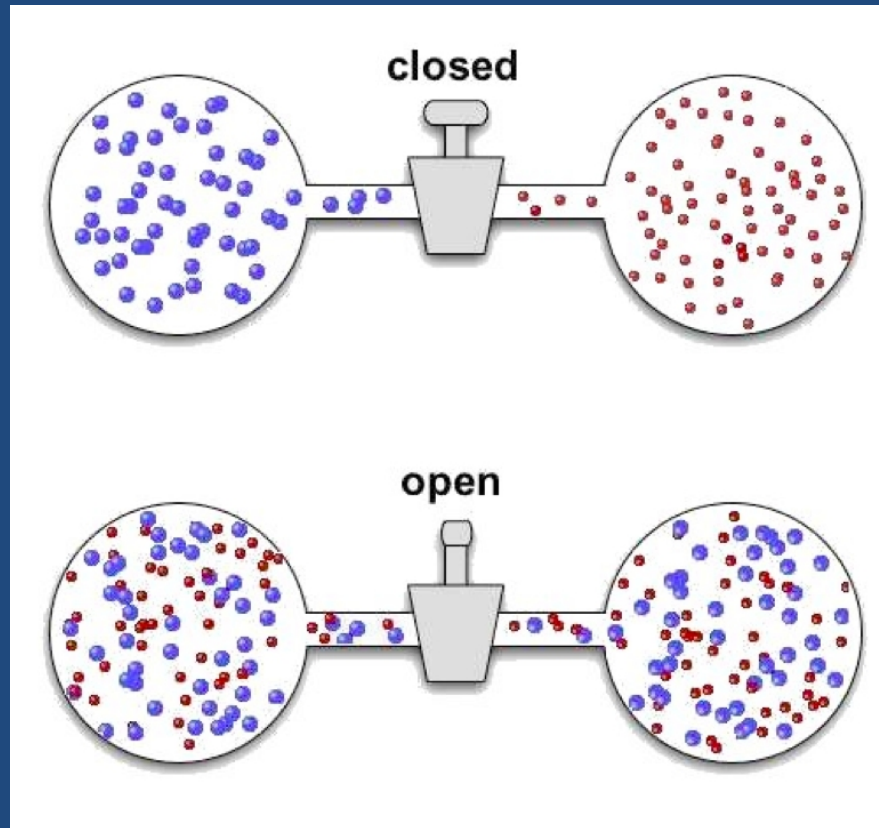
그러면 열역학적으로 정의된 엔트로피는
경우의 수를 통해 정의된 볼츠만 엔트로피와 같아집니다.



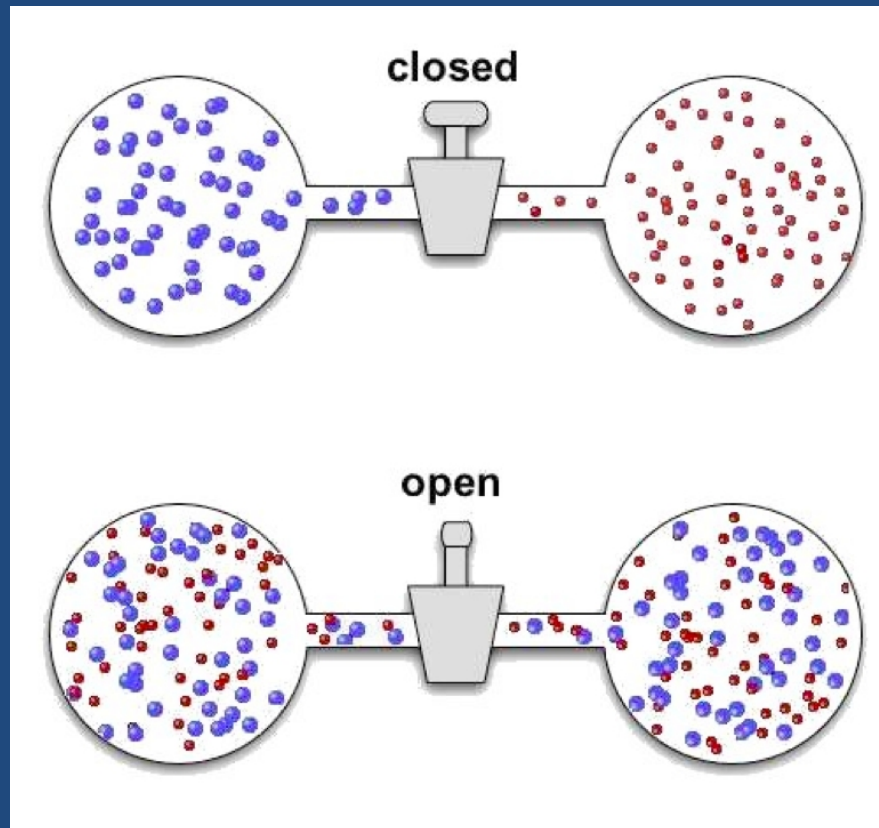
루트비히 에두아르트 볼츠만



엔트로피에 대한 성질을 좀 더 이해하기 위해
다음과 같은 혼합 과정을 생각해봅시다.



왼쪽의 부피를 xV , 오른쪽의 부피를 $(1 - x)V$ 라 하고
보라색 입자의 수를 xN , 빨간색 입자의 수를 $(1 - x)N$ 라 하고
압력과 온도는 양쪽에서 p 와 T 로 같다고 합시다.

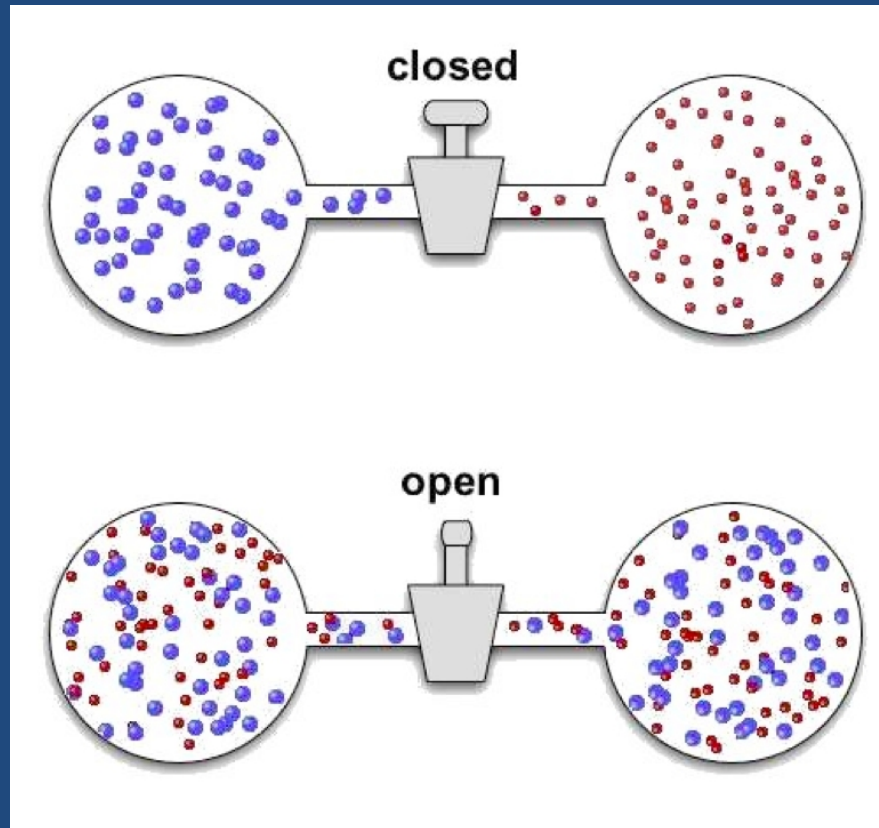


기체를 섞으면 자유팽창과 마찬가지로 $dE = 0$ 및 $TdS = pdV$ 가 됩니다.

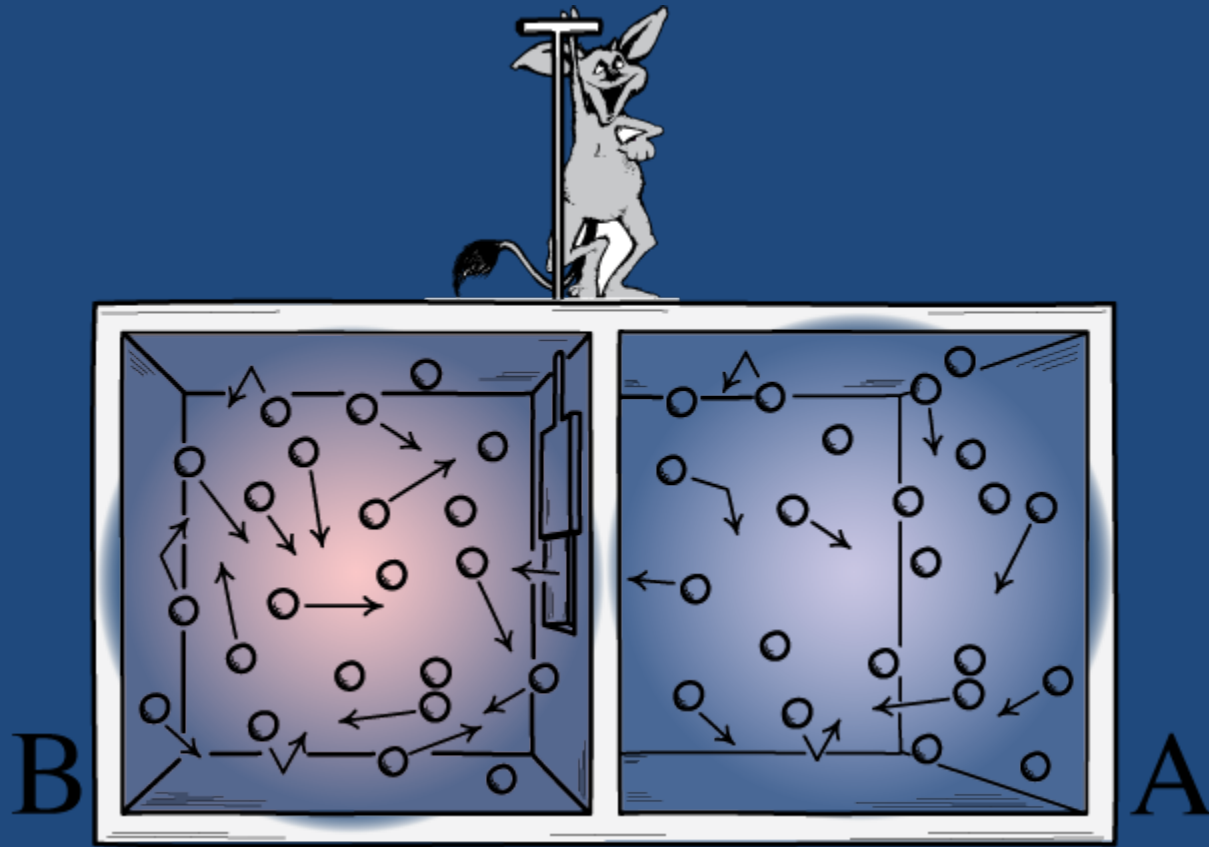


이것으로부터 엔트로피를 구할 수 있습니다.

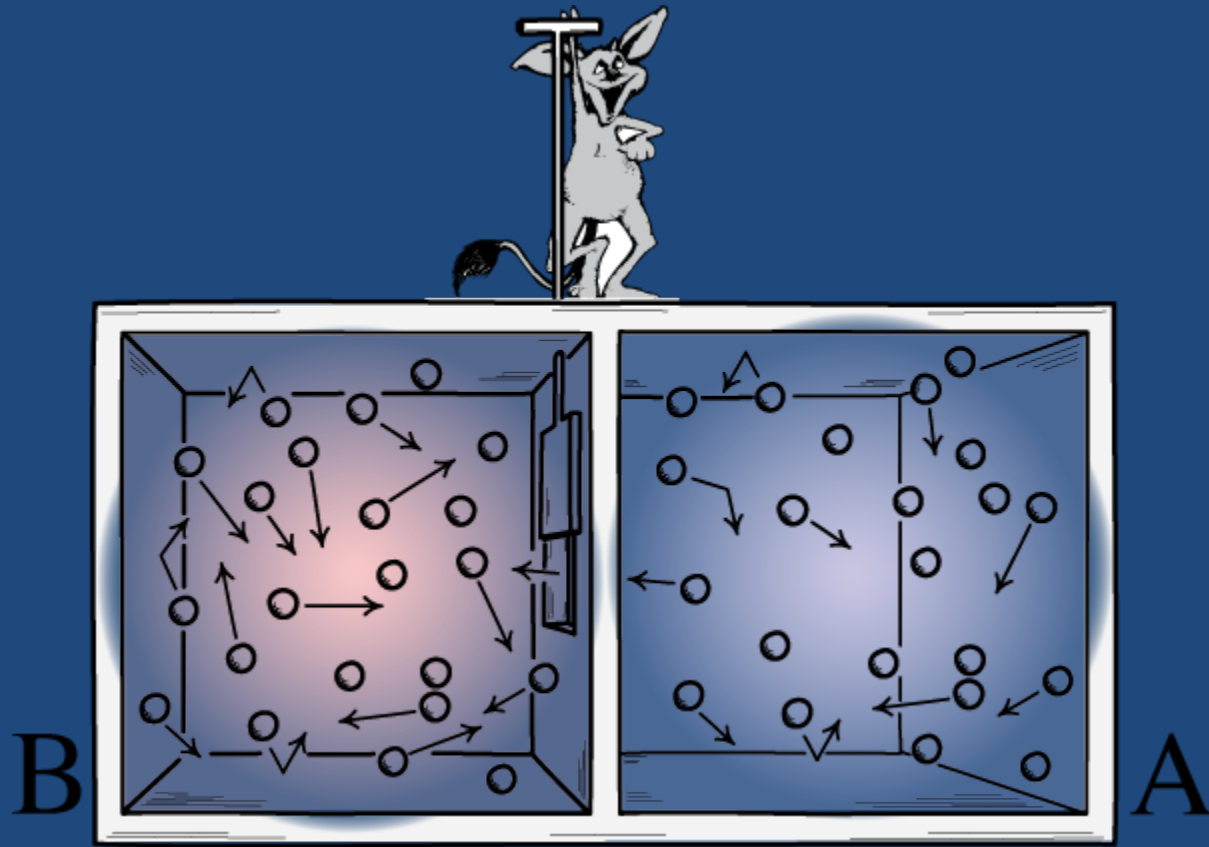
$$\Delta S = -Nk(x \ln x + (1 - x) \ln(1 - x))$$



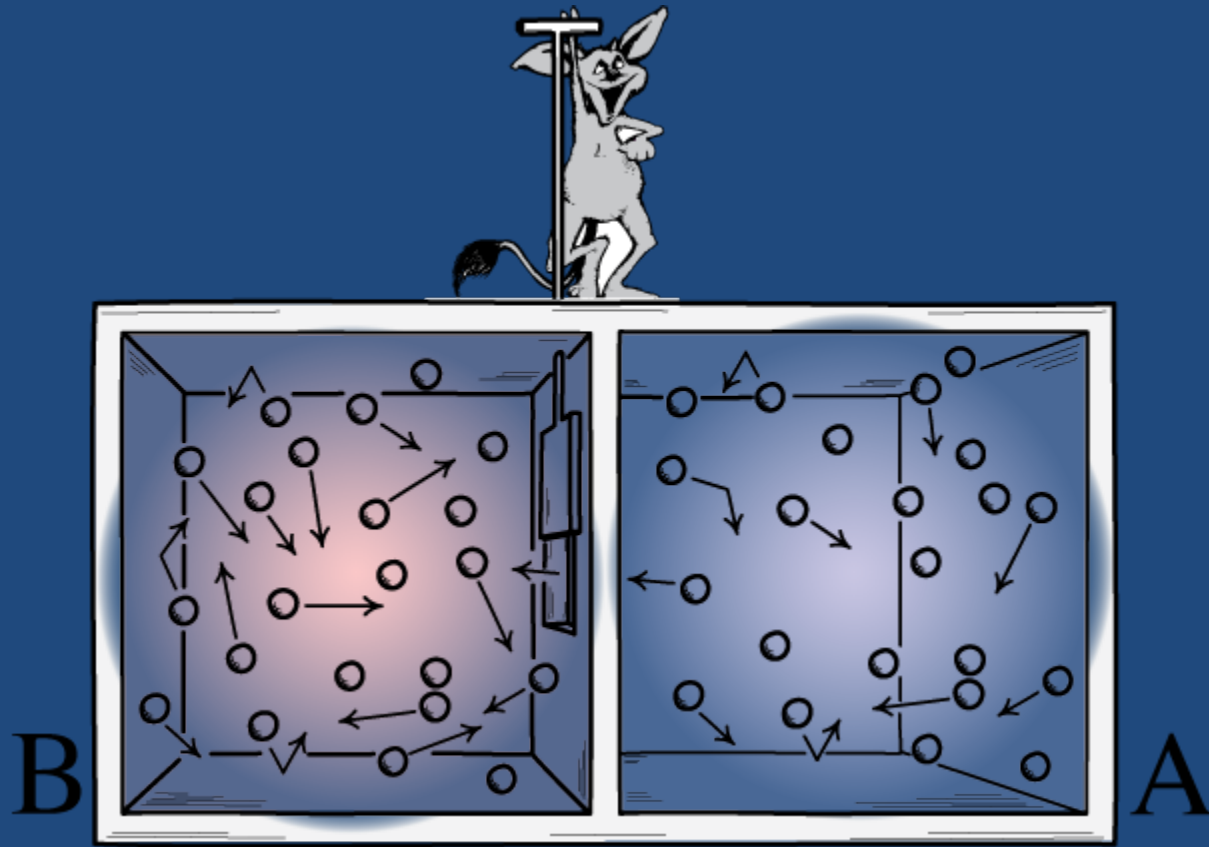
기체의 혼합은 엔트로피의 증가를 가져옵니다.
여기에는 몇 가지 재미있는 문제가 있는데,
그 중 하나는 입자를 '구분'할 수 있어야 한다는 것입니다.



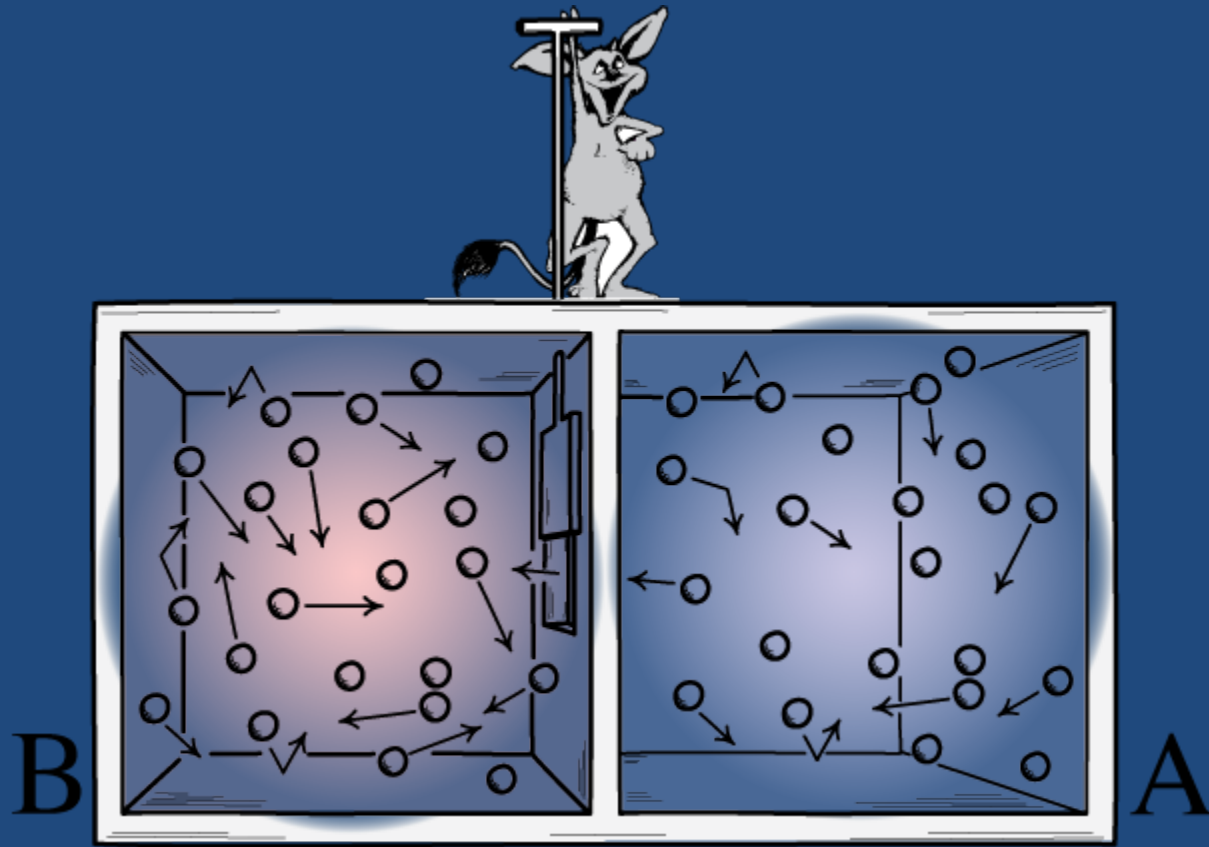
맥스웰의 악마란 입자가 왼쪽에서 오른쪽으로 가면 문을 닫고
오른쪽에서 왼쪽으로 가면 문을 여는 악마를 말합니다.



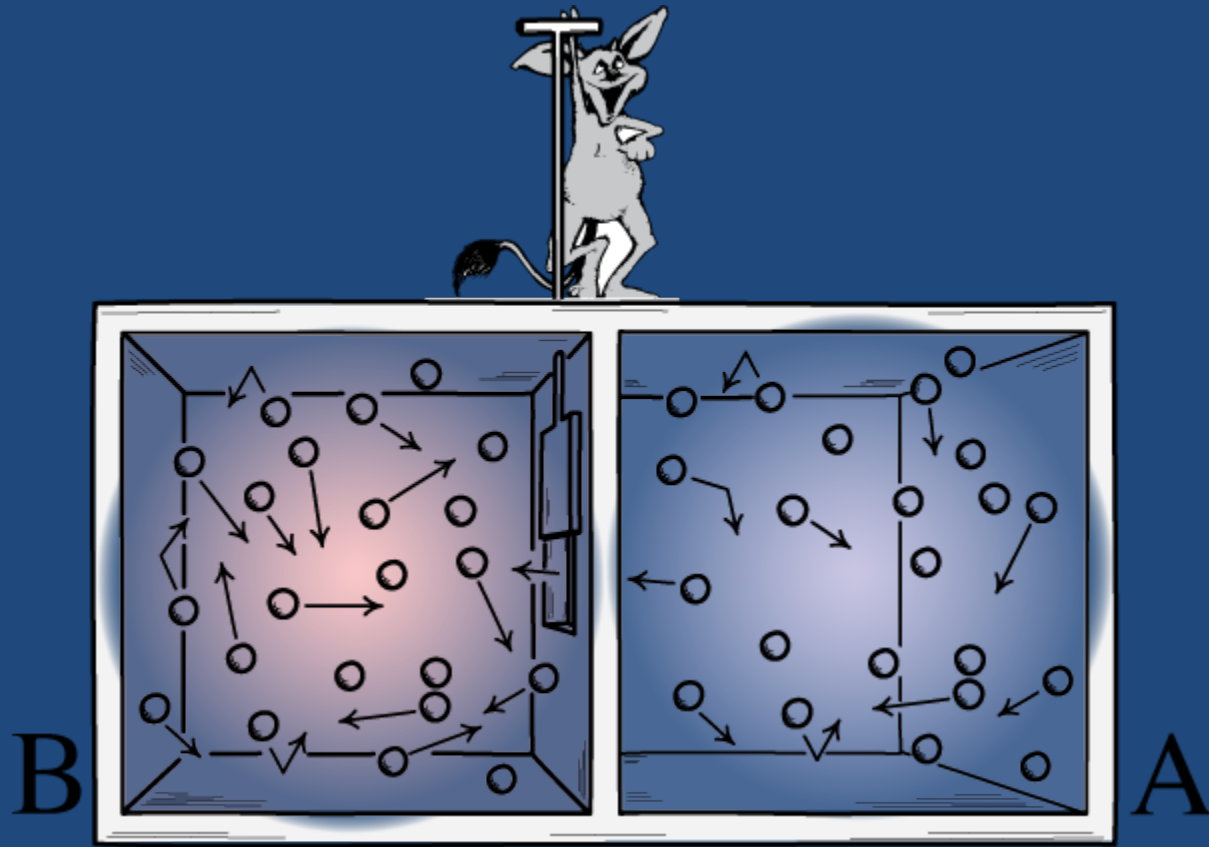
이런 악마가 존재한다면 엔트로피를 감소시킬 수 있습니다.
이런 일이 가능할 수 있을까요?
불가능하다면 그 이유는 무엇일까요?



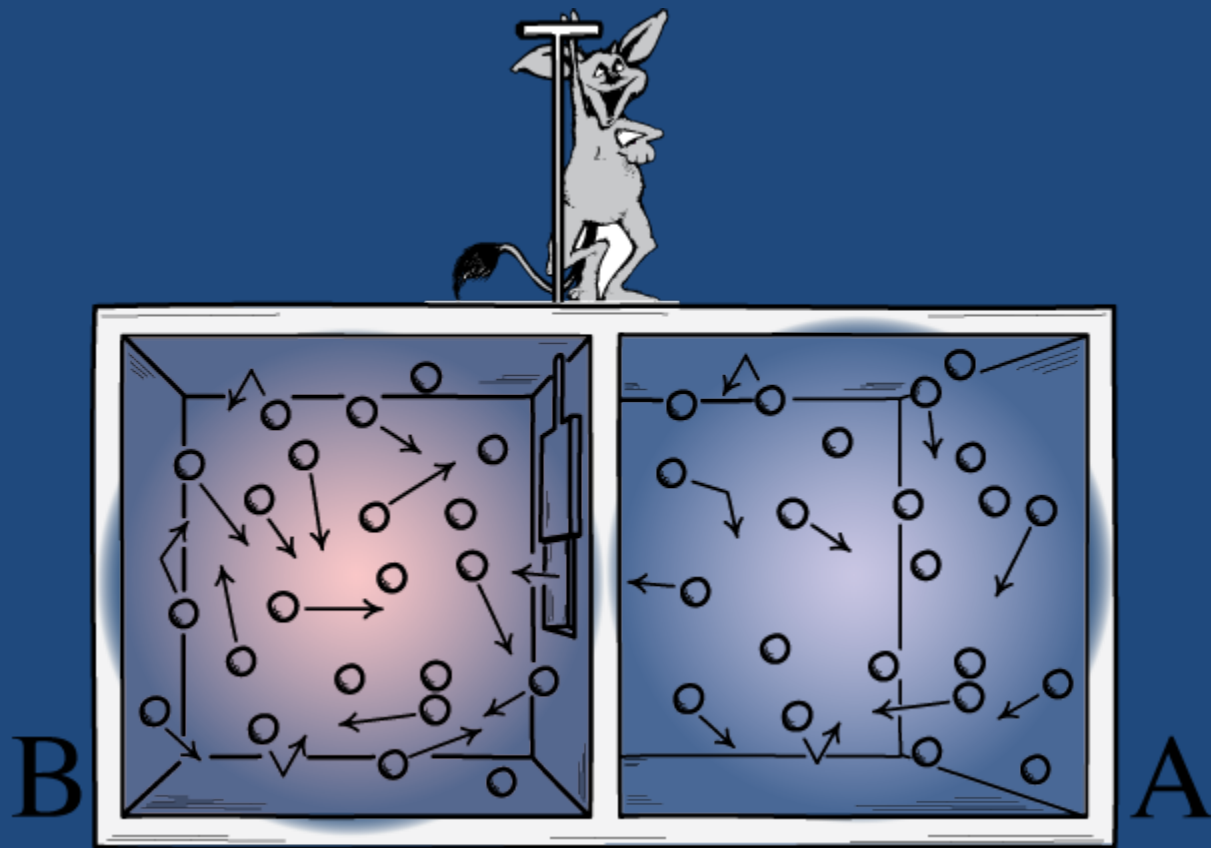
아마도 이 문제를 해결하는 방법은
정보information와 연관 짓는 것입니다.



맥스웰의 악마는 엔트로피를 줄이기 위해 **계산**을 합니다.



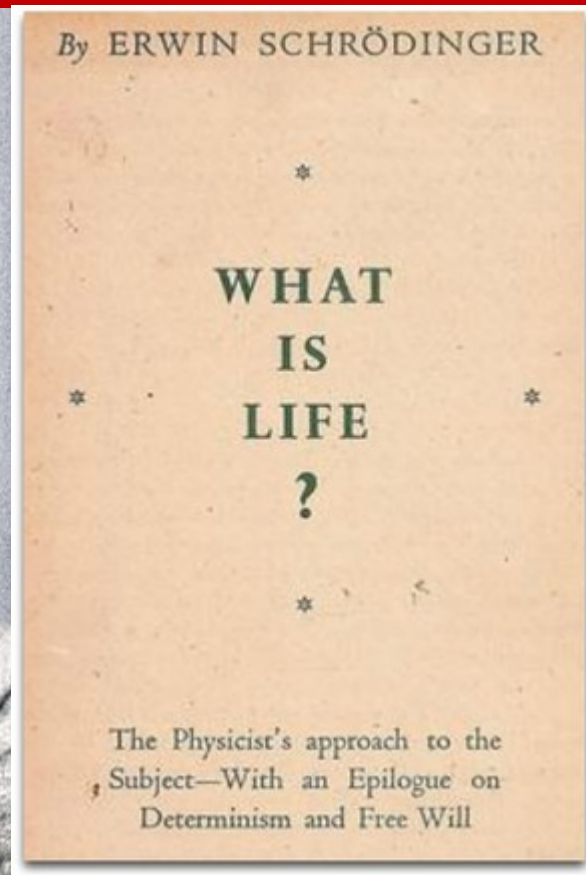
이 계산 과정은 가역적일 수 있지만
정보의 저장공간의 용량이 유한하다면
어느 순간에는 **정보를 지워야** 합니다.



문제는 이 정보를 지우는 과정에서
엔트로피가 증가한다는 것입니다.
따라서 정보의 저장공간이 무한히 크지 않은 이상
맥스웰의 도깨비는 엔트로피를 증가시켜야 합니다.

오늘날 물리학자들은 지금까지 살펴본
열역학적 엔트로피와 볼츠만 엔트로피를
정보의 관점에서 근본적으로 다시 정의하고자 합니다.

이러한 엔트로피의 정의는 더 깊이 들어가면
양자역학의 파동함수와 맞닿아 있습니다.



에르빈 슈뢰딩거의 “생명이란 무엇인가?”

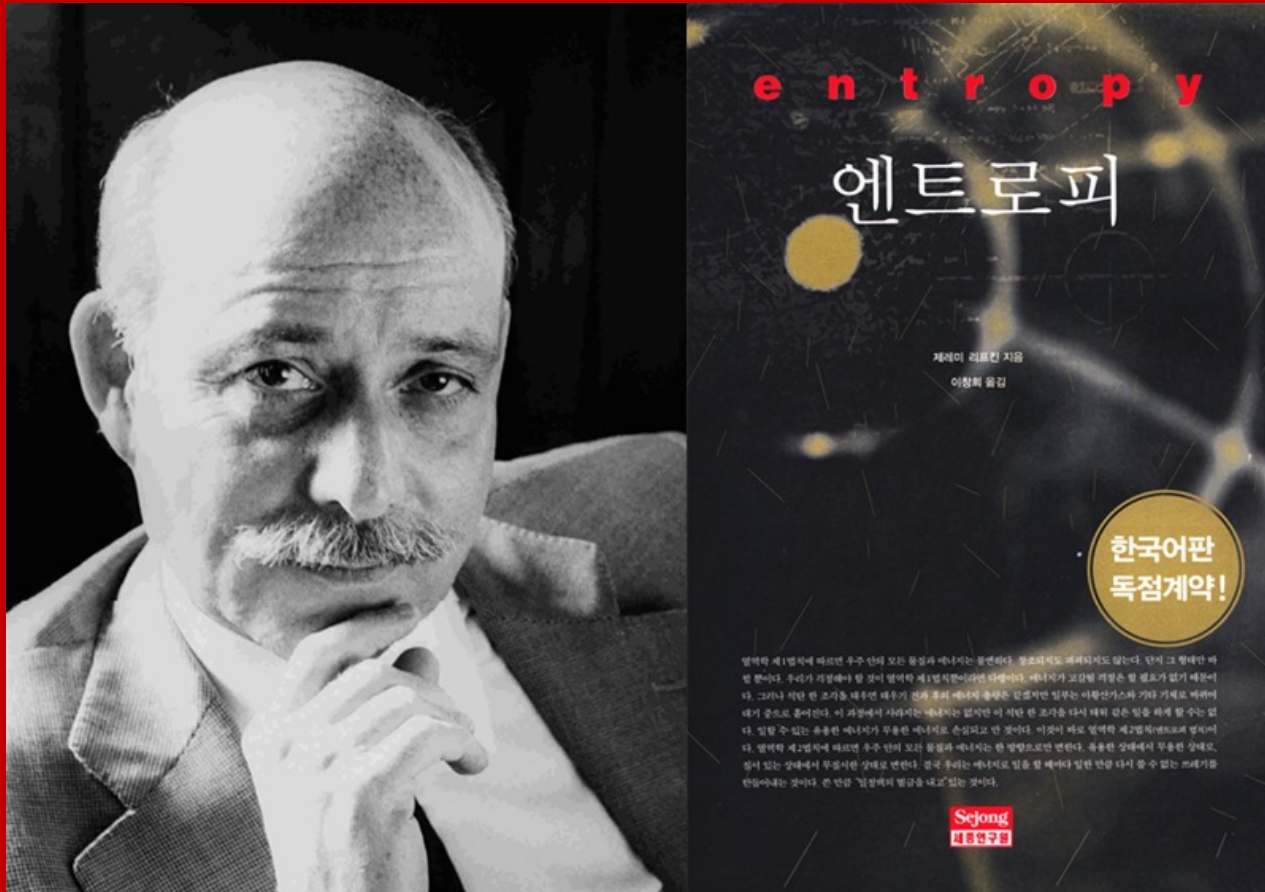
슈뢰딩거는 먼저 통계역학적 조사로부터
샘플의 개수가 늘어날수록
측정의 불확정성이 $\sqrt{n}$ 에 비례한다는 것,
즉 특정한 규칙성을 발견하기 어려워진다는 것을 설명합니다.

그러나 생명체에서는 이러한 오차에 비해
훨씬 더 뚜렷한 질서가 발견된다는 것에 주목합니다.

슈뢰딩거는 이렇게 통계적 경향성을 거스르는
생명의 특성을 설명하기 위해,
생명체로 음의 엔트로피negative entropy/negentropy가
유입된다고 해석합니다.

슈뢰딩거는 이렇게 통계적 경향성을 거스르는
생명의 특성을 설명하기 위해,
생명체로 음의 엔트로피negative entropy/negentropy가
유입된다고 해석합니다.

여러분들은 슈뢰딩거의 견해를 어떻게 평가합니까?



제레미 리프킨의 “엔트로피”

리프킨은 열역학의 법칙으로부터
에너지는 보존되고 엔트로피는 증가한다고 이야기합니다.
따라서 우리가 사용할 수 있는 유용한 에너지는
점점 줄어들게 됩니다.

따라서 물질적 진보에 따른 성장은 환상에 불과하며,
이대로 지속하다 보면 언젠가 인류는 자멸하게 될 것이라고 합니다.

리프킨은 열역학의 법칙으로부터
에너지는 보존되고 엔트로피는 증가한다고 이야기합니다.
따라서 우리가 사용할 수 있는 유용한 에너지는
점점 줄어들게 됩니다.

따라서 물질적 진보에 따른 성장은 환상에 불과하며,
이대로 지속하다 보면 언젠가 인류는 자멸하게 될 것이라고 합니다.

여러분은 이러한 주장에 대해서는 어떻게 평가합니까?



마블 시네마틱 유니버스의 “엔트로피”

이렇게 엔트로피라는 개념은
다양한 맥락에서 오해되어 사용되어 왔습니다.

우리는 좀 더 정확한 물리학적 이해에 기반을 두어
잘못된 지식을 전달하지 않도록 조심할 필요가 있습니다.

감사합니다