

물리학이 발견한 것들 03

엔트로피

글. 권태혁 아리랑국제방송 기술센터 부장

엔트로피에 대한 대략적인 설명

엔트로피는 물리학의 기본 개념이지만 혼동의 소지가 다분하다. 요즘은 일상적인 대화에서도 엔트로피가 종종 화젯거리로 등장하고 있는데, 주변 상황이 질서에서 무질서로 변하거나 좋은 것에서 나쁜 것으로 변하는 이유를 설명할 때 주로 언급된다. 물론 여기에 잘못된 것은 없다. 필자도

이런 식으로 엔트로피를 종종 언급해 왔다. 그러나 우리의 여정에서 길을 잃지 않으려면 엔트로피의 의미를 좀 더 정확하게 알아둘 필요가 있다.

간단한 사례에서 시작해 보면, 당신이 1센트짜리 동전 100개를 상자에 넣고 열심히 흔든 후 테이블 위에 쏟아부었는데, 모든 동전의 앞면이 위를 향하고 있다면 입이 딱 벌어질 것이다. 왜 그런가? 직관적으로는 놀라

는 게 당연하지만, 그 이유를 찬찬히 생각해 보자. 뒷면이 단 1개도 안 나왔다는 것은 동전 100개가 상자 속에서 무작위로 섞인 후 테이블에 부딪혀서 이리저리 구르다가 한결같이 앞면이 위를 향한 채 정지했다는 뜻이다. 이런 특별한 경우가 나올 확률은 지극히 낮다. 그렇다면 동전 99개가 앞면이 나오고 단 1개만 뒷면이 나오는 경우를 생각해 보자. 이것도 확률이 낮기는 마찬가지지만, 경우의 수를 따지면 100개 모두 앞면이 나오는 경우보다 100배나 많다. 모든 동



전에 1부터 100까지 고유 번호를 매겨 놓았다면 뒷면이 나온 동전이 1번 동전일 수도 있고, 2번 동전일 수도 있고... 100번 동전일 수도 있기 때문이다. 그러므로 99개가 앞면이 나오고 1개가 뒷면이 나올 확률은 100개 모두 앞면이 나올 확률보다 100배나 높다.

다른 경우도 생각해 보자. 100개 중 2개가 뒷면이 나오는 경우의 수는 4,950가지다(1번과 2번 동전, 3번과 4번 동전, 5번과 6번 동전 등...). 내친김에 좀 더 계산을 해보면 동전 3개가 뒷면이 나오는 경우는 161,700가지이고, 4개가 뒷면이 나오는 경우는 약 400만 가지이며, 5개가 뒷면이 나오는 경우는 약 7,500만 가지나 된다. 구체적인 계산법은 중요하지 않다(앞으로 언급될 다른 개념들도 수학적인 설명은 가능한 한 생략할 것이다). 여기서 중요한 것은 뒷면의 개수가 많을수록 경우의 수가 급격하게 증가한다는 사실이다. 경우의 수가 가장 많은 것은 앞면과 뒷면이 모두 50개씩 나오는 경우인데, 그 값은 무려 $1,000억 \times 10억 \times 10억$ 가에 달한다(정확한 값은 100,891,344,545,564,193,334,812,497,256이다). 그러므로 앞면과 뒷면이 50개씩 나올 확률은 100개 모두 앞면이 나올 확률보다 $1,000억 \times 10억 \times 10억$ 배나 높다. 100개 모두 앞면이 나왔을 때 입이 딱 벌어지는 것은 바로 이런 이유 때문이다. (100개 모두 앞면 또는 뒷면이 나오는 경우의 수는 단 한 가지뿐이다.)

대부분의 사람들은 동전 무더기의 거동을 직관적으로 분석할 때, 용기 속 수증기의 거동을 분석했던 맥스웰과 볼츠만의 방법을 그대로 따르고 있다. 앞에서 제시한 설명도 여기에 기초한 것이다. 과학자들이 셀 수없이 많은 숫자의 수증기 분자를 날개로 분석하지 않는 것처럼, 우리도 동전 무더기의 분포를 날개로 분석하지 않는다. 29번 동전이 앞면이 나왔는지, 71번 동전이 뒷면이 나왔는지는 중요하지 않다. 중요한 것은 전체적인 분포 상태이며, 우리의 관심을 끄는 것은 앞면과 뒷면의 비율이다. 앞면이 뒷면보다 많이 나왔는가? 2배인가? 3배인가? 아니면 앞면과 뒷면이 거의 비슷한가? 동전 100개를 여러 번 던졌을 때 앞면과 뒷면의 비율이 달라지면 금방 눈에 띈다. 그러나 비율은 똑같으면서 앞면(또는 뒷면)이 나온 동전의 번호만 달라진다면 그 차이는 거의 눈에 띄지 않는다. 예를 들어 동전 100개를 던진 후 뒷면이 나온 23, 46, 92번 동전을 앞면으로 뒤집고 앞면이 나온 17, 52, 81번 동전을 뒷면으로 뒤집었다고 하자. 똑같이 3개씩 뒤집었으므로 앞면과 뒷면의 비율은 달라지지 않는다. 그렇다면 당신은 두 경우의 차이를 구별할 수 있겠는가? 초능력 보유자라면 모를까, 우리처럼 평범한 사람들에게는 어렵도 없는 일이다. 동전 100개를 던졌을 때 나올 수 있는 결과를 몇 개의 그룹으로 나누었다. 각 그룹은 앞면(또는 뒷면)이 나온 동전의 개수가 같은데, 어떤 동전이 앞면인지는 중

요하지 않다(사실 구별할 수도 없다). 그리고 뒷면이 나온 동전이 1개도 없는 경우와 뒷면이 1개 나온 경우, 2개 나온 경우, 3개, 4개, ...50이 나온 경우의 수를 계산했다.

여기서 중요한 것은 각 그룹의 '회귀성'이 동일하지 않다는 점이다. 평등은커녕, 최고 $1,000억 \times 10억 \times 10억$ 배까지 차이가 난다. 그래서 동전 100개를 마구 섞은 후 테이블에 던졌을 때 100개 모두 앞면(또는 뒷면)이 나오면 소스라치게 놀라고(이 그룹의 멤버는 단 1개뿐이다), 뒷면이 1개 나오면 조금 덜 놀라고(멤버 수 = 100), 뒷면이 2개 나오면 1개 나온 경우보다 보다 조금 덜 놀라고(멤버 수 = 4,950), 앞면과 뒷면이 50개씩 나오면 너무 평범해서 하품이 나온다(멤버

“

엔트로피는
물리학의 기본 개념이지만
혼동의 소지가 다분하다.
주변 상황이 질서에서
무질서로 변하거나
좋은 것에서 나쁜 것으로
변하는 이유를 설명할 때
주로 언급된다.

”

버 수 = 약 1,000억×10억×10억). 그룹의 멤버 수가 많을수록 그와 같은 결과가 나올 확률이 높아진다. 그러므로 우리에게 중요한 것은 각 그룹의 크기다.

당신이 평소에 이런 생각을 해 본 적이 없다면, 엔트로피의 기본 개념에 대한 설명이 완료되었다는 것을 눈치 채지 못할 수도 있다. 주어진 배열(그룹)의 엔트로피는 그 그룹의 크기, 즉 '서로 구별되지 않는 멤버의 수'와 같다. 그러므로 멤버가 많은 배열은 엔트로피가 높고, 멤버가 적은 배열은 엔트로피가 낮다. 여러 개의 동전을 상자에 넣고 무작위로 흔든 후 테이블 위에 쏟았을 때 나타난 배열은 엔트로피가 높은 그룹에 속할 가능성이 높다. 엔트로피가 높을수록 멤버의 수가 많기 때문이다.

바로 이런 이유로 일상적인 대화에서 엔트로피를 '질서를 망가뜨리는 주범'으로 간주해도 큰 문제가 없는 것이다. 당신의 사무실이 오랫동안 정리를 하지 않아 완전히 난장판이 되었다고 가정해 보자. 책상 위에 온갖 서류 더미가 너저분하게 쌓여 있고, 펜과 포스트잇, 명함, 클립 등이 사방에 어지럽게 널려 있다. 이런 상태에서는 각 물건의 위치를 바꿔도 무질서도가 크게 달라지지 않는다. 예를 들어 빨간색 펜과 검은색 펜의 위치를 맞바꿔도 난장판은 별로 개선되지 않는다. 다시 말해서 '현재의 무질서도를 유지한 채 바꿀 수 있는 배열의 수'가 엄청나게 많다. 이것은 동전의

“
주어진 배열의
엔트로피는 그 그룹의 크기,
즉 '서로 구별되지 않는
멤버의 수'와 같다.
그러므로 멤버가 많은 배열은
엔트로피가 높고,
멤버가 적은 배열은
엔트로피가 낮다.

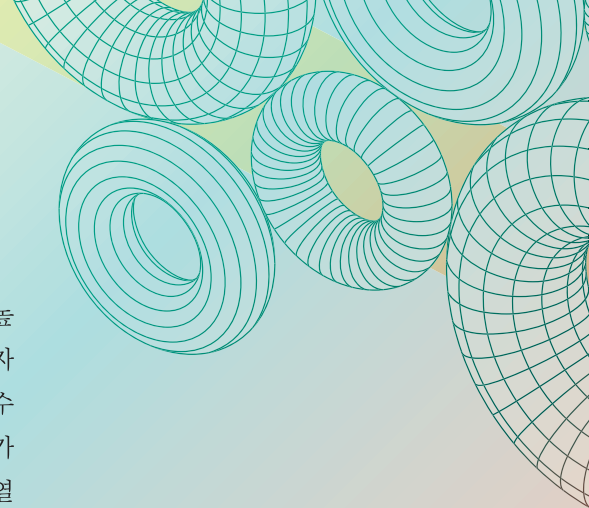
경우 '멤버의 수가 많은 그룹'에 해당한다. 따라서 어지럽게 널려 있는 사무실은 엔트로피가 높다. 그러던 어느 날, 참다못한 당신은 마음을 굳게 먹고 사무실을 말끔하게 정리했다. 서류는 항목별로 정리하여 책꽂이에 알파벳순으로 꽂아 넣고, 펜은 색상순으로, 포스트잇과 클립은 크기순으로 정리하여 사무용품 정리함에 차곡차곡 쌓아 놓았다. 이런 상태에서는 물건의 배열을 조금만 바꿔도 무질서도가 크게 증가한다. 즉, '현재의 정돈된 상태를 유지한 채 바꿀 수 있는 배열의 수'가 몇 개 되지 않는다. 따라서 정돈된 상태는 '멤버의 수가 적은 그룹'에 해당하여 엔트로피가 낮다. 동전의 경우와 마찬가지로 너저분한 배열은 정돈된 배열보다 경우의 수가 많기 때문에 엔트로피가 높은 것이다.

엔트로피의 진정한 의미

거시적 외관을 분석하는 이유

앞에서 동전을 예로 든 이유는 과학자들이 증기기관 안에서 이리저리 움직이는 물 분자나 지금 우리가 숨 쉬고 있는 방 안에 떠다니는 공기 분자와 같이 수많은 입자로 이루어져 있는 물리계를 분석할 때, 동전과 동일한 방법을 사용하기 때문이다. 수증기나 공기의 상태를 분석할 때에는 동전의 경우와 마찬가지로 입자의 개별적 상태를 무시하고(특정 분자가 이곳에 있는지, 또는 저곳에 있는지는 중요하지 않다) 겉으로 보기에 비슷한 배열을 하나의 그룹으로 묶으면 특정한 물리적 상태가 나타날 확률을 계산할 수 있다. 여러 개의 동전을 테이블에 던졌을 때 각 동전의 상태보다 앞면과 뒷면의 비율에 집중하는 이유는 전체적인 외관이 동전의 개별적 상태보다 눈에 훨씬 잘 띄기 때문이다. 그렇다면 수많은 분자로 이루어진 개체의 경우 '비슷한 배열'의 기준은 과연 무엇일까?

지금 당신의 방을 가득 채우고 있는 공기를 예로 들어보자. 당신이 초능력자가 아니라면 산소 분자가 창문에 부딪혔는지, 질소 분자가 바닥에 부딪혀서 튀어 올랐는지 알 길이 없고, 알 수가 없으니 관심을 가질 필요도 없다. 공기에 관한 한 당신의 관심은 “숨쉬기에 충분한 양이 방 안에 남아 있는가?”일 텐데, 방에서 자다가 질식했다는 사례는 들어본 적이 없으니



이것도 신경 쓸 필요가 없다. 그 외에 또 뭐가 있을까? 그렇다. 공기의 온도가 너무 높아서 폐가 타들어 가면 곤란하다. 그리고 공기의 압력이 너무 높으면 고막이 파열될 수도 있다. 그러므로 공기와 관련하여 당신이 신경 써야 할 항목은 공기의 부피와 온도, 그리고 압력이다. 맥스웰과 볼츠만에서 현대에 이르는 모든 물리학자는 이 세 가지 거시적 특성에 기초하여 기체의 특성을 분석했다.

2개의 용기 A, B에 기체가 들어 있을 때, 각 분자의 위치와 속도가 다르다 해도 A와 B의 부피와 온도, 그리고 압력이 같으면 두 배열은 외관상 동일하게 보인다. 이런 경우 동전의 사례처럼 동일하게 보이는 분자 배열을 하나로 묶어서 그룹을 만들면 각 그룹의 멤버들은 ‘동일한 거시 상태’에 놓이게 되고, 각 거시상태의 엔트로피는 외관상 동일한 멤버의 수로 정의된다. 방에 히터를 켜지 않고 (즉, 온도를 바꾸지 않고), 밀폐형 칸막이를 설치하지 않고(부피를 바꾸지 않고), 산소를 추가하지 않아도(압력을 바꾸지 않아도), 공기 분자의 배열은 순간마다 달라진다. 그러나 온도와 부피, 그리고 압력이 일정하기 때문에 시간에 따라 달라지는 모든 배열은 동일한 그룹에 속한다.

외관상 동일한 배열을 하나의 그룹으로 묶었을 때 얻는 이득은 가히 상상을 초월한다. 무작위로 허공에 던져진 동전 무더기의 최종 상태가 ‘멤버

의 수가 많은 그룹’에 속할 확률이 높은 것처럼, 무작위로 부딪히는 입자들도 마찬가지다. 증기기관 속의 수증기이건 방 안의 공기이건 간에, 가장 빈번하게 나타나는 전형적인 배열(멤버의 수가 가장 많은 배열)을 알면 계의 거시적 물리량을 예측할 수 있다. 우리에게 중요한 것은 바로 이런 양이다. 물론 이것은 통계에 입각한 예측이지만, 입자의 수가 충분히 많으면 맞을 확률이 매우 높다. 여기서 중요한 것은 수많은 입자의 궤적을 일일이 계산하지 않고서도 원하는 답을 얻어냈다는 점이다.

수증기의 상태가 엔트로피에 미치는 영향

이 논리를 적용하려면 일상적인 배열(높은 엔트로피)과 특별한 배열(낮은 엔트로피)을 정확하게 구별할 수 있어야 한다. 다시 말해서, 계의 거시적 특성에 영향을 주지 않은 채 바꿀 수 있는 배열의 수를 헤아릴 수 있어야 한다는 뜻이다. 샤워를 마친 후 증기로 가득 찬 욕실을 예로 들어보자. 증기의 엔트로피를 결정하려면 거시적 특성(부피, 온도, 압력)이 동일한 상태에서 분자의 가능한 배열 수(모든 분자가 가질 수 있는 위치와 속도의 가짓수)를 알아야 한다.

H₂O 분자의 개수를 수학적으로 헤아리는 것은 동전의 수를 헤아리는 것보다 훨씬 어렵지만, 대학교 물리학과 2학년이면 배우는 내용이다. 그러나 이보다는 수증기의 부피와

온도, 그리고 압력이 엔트로피에 미치는 영향을 분석하는 것이 훨씬 효율적이다.

- 수증기의 부피

욕실을 떠다니는 H₂O 분자(수증기 분자)들이 한쪽 구석에 모여들어서 그곳만 밀도가 높아지고 다른 곳은 텅 비었다고 상상해 보라. 이런 상태에서 분자를 재배열하면 좁은 고밀도 지역을 벗어나기만 해도 전체적인 상태(거시적 특성)가 달라지기 때문에, 거시적 특성을 바꾸지 않고 분자를 재배열하는 방법의 수가 크게 제한된다. 반면에 수증기 분자들이 욕실 전체에 골고루 퍼져 있으면 재배열하는 방법이 엄청나게 많아진다. 화장대 근처에 있는 분자를 조명등 근처에 있는 분자와 맞바꾸건, 창문 근처의 분자와 맞바꾸건, 또는 샤워 커튼 근처에 있는 분자와 맞바꾸건, 전체적인 배열은 달라지지 않기 때문이다. 또한 욕실이 클수록 각 분자가 점유할 수 있는 위치가 많아지므로, 분자를 재배열하는 방법의 수가 많아진다. 그러므로 분자들이 좁은 영역에 뭉뭉하게 모여 있으면 엔트로피가 낮고, 넓은 영역에 골고루 퍼져 있으면 엔트로피가 높다.

- 수증기의 온도

분자 규모에서 온도는 과연 무슨 의미일까? 답은 잘 알려져 있다. 여러 개의 분자로 이루어진 물체에서 온도는 분자의 평균 속도를 의미한다. 일반적으로 분자의 평균 속도가 느린 물체는 차갑고, 평균 속도가 빠른 물체는 뜨겁다. 그러므로 온도가 엔트로피에 미치는 영향을 알아낸다는 것은 분자의 평균 속도가 엔트로피에 미치는 영향을 알아내는 것과 같은 이야기다. (수)증기의 부피를 분자의 위치 변화로 이해했던 앞의 논리를 비슷하게 적용하면 된다. 증기의 온도가 낮으면 거시적 특성을 유지한 채 분자의 속도를 재배열할 수 있는 경우의 수가 별로 많지 않다.

예를 들어 일부 분자의 속도를 높이면서 온도를 그대로 유지하려면 다른 분자의 속도를 낮춰야 한다. 그런데 증기의 온도가 낮으면(즉, 분자의 평균속도가 느리면) 속도를 바꿀 여지가 별로 없다. 분자의 속도는 0보다 작을 수 없기 때문이다. 그러므로 낮은 온도에서는 분자가 취할 수 있는 속도의 범위가 제한되고, 분자를 재배열할 수 있는 경우의 수도 줄어들어서 엔트로피가 작다. 반면에 증기의 온도가 높으면 재배열할 수 있는 여지가 많아진다. 온도가 높다는 것은 분자 속도의 평균값이 크다는 뜻이고, 속도의 평균값이 크면 (평균값을 유지한 채) 속도를 바꿀 수 있는 폭이 넓어지기 때문이다. 즉, 뜨거운 증기는 거시적 특성을 바꾸지 않은 채 재배열할 수 있는 경우의 수가 많

으므로 엔트로피가 크다.

- 수증기의 압력

마지막으로 압력과 엔트로피의 관계를 생각해 보자. 당신의 피부나 욕실의 벽에 가해지는 증기의 압력은 H_2O 분자들이 그곳을 연속적으로 때리면서 나타나는 현상이다. 1개의 분자가 가하는 충격은 극히 미미하지만, 개수가 많으면 당신의 감각이 느낄 수 있을 정도로 큰 힘을 발휘한다. 즉, 한순간에 충돌하는 분자의 수가 많을수록 압력이 높다. 그러므로 부피와 온도가 고정되어 있을 때 욕실의 증기압은 욕실 안에 있는 분자의 수에 의해 결정되며, 이 값이 엔트로피에 미치는 영향은 아주 쉽게 계산할 수 있다. H_2O 분자의 수가 작으면 (샤워를 번개같이 해치운 경우) 재배열될 수 있는 경우의 수가 적어서 엔트로피가 작고, H_2O 분자가 많으면 (느긋하게 샤워를 한 경우) 재배열될 수 있는 경우의 수가 많아서 엔트로피가 크다.

결론은 이렇다. 분자의 수가 작거나, 온도가 낮거나, 점유 공간의 부피가 작으면 엔트로피가 작고, 분자의 수가 많거나, 온도가 높거나, 점유 공간의 부피가 크면 엔트로피가 크다.

높은 엔트로피가 익숙한 상태

지금까지 언급된 내용을 바탕으로, 엔트로피와 관련하여 ‘항상 옳지는 않지만 경험에 비춰 볼 때 거의 사실에 가까운’ 명제 하나를 강조하고자 한다. 간단히 말해서, 당신이 경험하는 상태는 대부분 엔트로피가 높은 상태라는 것이다. 고엔트로피 상태는 구성 입자의 다양한 배열을 통해 구현될 수 있으므로 전형적이고 평범하면서 흔한 상태다. 반면에 당신이 저엔트로피 상태와 접하면 일단 주의를 기울일 필요가 있다. 엔트로피가 낮다는 것은 거시상태를 유지하면서 바꿀 수 있는 배열의 수가 적다는 뜻이어서, 고엔트로피 상태보다 드물게 나타나기 때문이다. 욕실 안의 수증기가 골고루 분포된 경우보다 한쪽 구석에 몰려 있는 경우가 훨씬 드물게 나타난다. 아니, 후자의 경우는 거의 불가능하다고 봐도 무방하다. 당신이 느긋하게 샤워를 마치고 거울을 바라보고 있는데, 욕실 안에 있는 모든 수증기가 갑자기 거울 앞의 조그만 정육면체 영역 안에 모여든다면 무슨 생각을 떠올리겠는가? 이런 현상을 당연하게 받아들이는 사람은 없다. 아마도 당신은 “누군가가 욕실의 공기를 인위적으로 조작하여 나를 질식시키려 하고 있다.”라고 생각할 것이다. 자연적인 상태에서 이런 일이 발생할 확률이 0은 아니지만, 필자는 당신이 사는 동안 이런 일이 절대 자발적으로 일어나지 않는다는 쪽에 내 목숨을 걸 수 있다. 테이블 위에 놓여 있는 100개의 동전이 모두 앞면을 보

이고 있으면 무언가 조작되었다는 의구심이 드는 것처럼(누군가가 뒷면이 나온 동전을 모두 앞면으로 뒤집어 놓지 않았을까?), 엔트로피가 낮은 상태에 직면하면 일단 조작되었을 가능성을 의심해 볼 필요가 있다.

이 논리는 계란이나 거미집, 또는 머그잔처럼 일상적인 물체에도 똑같이 적용된다. 질서 정연하게 가공된 물체는 자연적으로 만들어지지 않기 때문에, 반드시 설명이 필요하다. 무작위로 움직이는 입자들이 저절로 뭉쳐서 계란이나 개미집, 또는 머그잔이 만들어질 수도 있지만, 이런 일이 실제로 일어날 확률은 거의 0에 가깝다. 그래서 우리는 이런 물체를 볼 때마다 생명 활동이나 생명체의 의지가 개입되었다고 생각한다. 계란과 개미집, 그리고 머그잔은 자연에 존재하는 입자의 무작위 배열에 특별한 형태의 생명 활동이 개입되어 질서 정연한 배열로 재탄생한 것이다. 생명이 질서를 창출하는 과정은 나중에 다루기로 하고, 지금은 “엔트로피가 낮은 질서 정연한 배열이 만들어지려면 무언가를 조직화하는 강력한 힘이 발휘되어야 한다.”라는 사실을 기억하는 것으로 충분하다.

사족

‘닫힌계에서 엔트로피는 증가한다’ 이것은 열역학 제2 법칙이다. 제2 법칙은 패러다임이 뒤바뀌는 과학혁명을 거치면서도 불변의 진리로 자리매김하고 있다. 여기서 등장하는 엔트로피의 개념을 쉽게 이해하기는 어렵다. 단순히 무질서도라 하기엔 앞뒤가 안 맞는 점들이 많다. 제러미 리프킨은 ‘엔트로피’라는 책을 출간하여 베스트셀러가 되었지만, 엔트로피의 정확한 개념을 이해하지 못했다며 물리학자들의 비판을 받았다.

엔트로피를 한 문장으로 요약하자면 ‘동일한 거시상태를 이루는 미시상태들의 경우의 수’라 할 수 있다.

앞의 글을 이해했다면 몇 번 머릿속으로 되뇌면 암기가 될 것이고 계속 헛갈리면 이해하지 못한 것이다.

빅뱅으로 우주가 탄생한 이후로 현재까지의 시간의 흐름을 관통하는 법칙이라 할 수 있는 것이 제2 법칙이다. 엔트로피가 증가한다는 것은 경우의 수들이 지속해서 증가해서 우주가 열적평형에 이르기까지 멈추지 않고 계속될 것이라는 의미이다. 원자로 이

루어진 우주의 모든 물질이 존재하는 방식의 경우의 수가 늘어난다는 것은 원자단위로 혹은 쿼크 단위로 다 균일하게 섞여(경우의 수가 많아져) 최후를 맞는다는 것이다. 물질이 모두 기본입자들로 분해될 것이다. 우주는 이런 종말을 향해 끊임없이 나아가는 중이다.

생명현상과 별의 탄생을 보면 엔트로피 법칙에 위배되는 것으로 보이지만, 별의 탄생과 그 생명이 살아가는 그 주변을 전체적으로 살펴보면, 별과 생명은 결국 엔트로피 증가를 가속시킬 뿐이다. 시간의 흐름도 엔트로피의 증가로 설명하기도 한다. 시간이 뒤로 흘러 과거로 돌아갈 수도 있지만, 시간이 거슬러 흐를 확률은 동전 백 개를 흔들어 동시에 모두가 앞면이 나오는 확률보다 비교가 안 될 만큼 작기 때문에 일어나지 않을 뿐이다. 이런 것들과 비교할 때 로또 복권의 당첨확률은 굉장히 높은 편이다. 우리가 로또에 당첨되지 않는 것은 로또를 매주 사지 않기 때문일지도 모른다. 

알림 : 인지심리학자 스티븐 핑커와 물리학자 브라이언 그린의 최근 저작을 요약했습니다.