

# ТЕРМОДИНАМИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Зорич В.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

## О чём речь?

- Аннотация
- Суть дела в двух словах
- Противоречие и его разрешение

Напоминания и пояснения

Несколько слов о статистической термодинамике

Демон Максвелла

Чёрные дыры и энтропия

Литература

О чём речь?

## Аннотация

Доклад будет посвящён актуальной теме — уборке мусора.

Мы напомним мысленный эксперимент Максвелла, получивший название «Демон Максвелла», опишем его научную эволюцию и то, как был переброшен мост от термодинамики к информатике.

Затем вспомним Хокинга и энтропию чёрных дыр.

## Суть дела в двух словах

Архимед говорил: дайте мне точку опоры и я подниму Землю.

Максвелл мог бы сказать: дайте мне неограниченную память и я сделаю вам вечный двигатель.

Это указание на связь термодинамики и информатики.

Мы собираемся обсудить эту связь на объекте, предложенном в 1871 году Максвеллом и получившем имя «Демон Максвелла».

## Суть дела в двух словах

Архимед говорил: дайте мне точку опоры и я подниму Землю.

Максвелл мог бы сказать: дайте мне неограниченную память и я сделаю вам вечный двигатель.

Это указание на связь термодинамики и информатики.

Мы собираемся обсудить эту связь на объекте, предложенном в 1871 году Максвеллом и получившем имя «Демон Максвелла».

## Суть дела в двух словах

Архимед говорил: дайте мне точку опоры и я подниму Землю.

Максвелл мог бы сказать: дайте мне неограниченную память и я сделаю вам вечный двигатель.

Это указание на связь термодинамики и информатики.

Мы собираемся обсудить эту связь на объекте, предложенном в 1871 году Максвеллом и получившем имя «Демон Максвелла».

## Суть дела в двух словах

Архимед говорил: дайте мне точку опоры и я подниму Землю.

Максвелл мог бы сказать: дайте мне неограниченную память и я сделаю вам вечный двигатель.

Это указание на связь термодинамики и информатики.

Мы собираемся обсудить эту связь на объекте, предложенном в 1871 году Максвеллом и получившем имя «Демон Максвелла».

## Противоречие и его разрешение

Возникающее здесь видимое противоречие с фундаментальными принципами термодинамики было предметом более чем 100-летних дискуссий и споров.

В 1982 году оно получило неожиданное разрешение, сводящееся к тому, что для циклической работы любого устройства, использующего память, память приходится время от времени очищать, чтобы решать очередную задачу.

Мусор надо убирать (как старые газеты и свалки) и это иногда стоит дороже получаемой информации.

Очистка памяти — процесс необратимый с точки зрения термодинамики.

## Противоречие и его разрешение

Возникающее здесь видимое противоречие с фундаментальными принципами термодинамики было предметом более чем 100-летних дискуссий и споров.

В 1982 году оно получило неожиданное разрешение, сводящееся к тому, что для циклической работы любого устройства, использующего память, память приходится время от времени очищать, чтобы решать очередную задачу.

Мусор надо убирать (как старые газеты и свалки) и это иногда стоит дороже получаемой информации.

Очистка памяти — процесс необратимый с точки зрения термодинамики.

## Противоречие и его разрешение

Возникающее здесь видимое противоречие с фундаментальными принципами термодинамики было предметом более чем 100-летних дискуссий и споров.

В 1982 году оно получило неожиданное разрешение, сводящееся к тому, что для циклической работы любого устройства, использующего память, память приходится время от времени очищать, чтобы решать очередную задачу.

Мусор надо убирать (как старые газеты и свалки) и это иногда стоит дороже получаемой информации.

Очистка памяти — процесс необратимый с точки зрения термодинамики.

О чём речь?

**Напоминания и  
пояснения**

- Что такое вечный двигатель и два начала термодинамики?
- Что такое равновесное термодинамическое состояние?
- Второе начало классической термодинамики и энтропия
- Контактная форма Гиббса
- Поведение энтропии замкнутой системы

Несколько слов о статистической термодинамике

Демон Максвелла

Чёрные дыры и энтропия

Литература

# Напоминания и пояснения

## Что такое вечный двигатель и два начала термодинамики?

а. Вечные двигатели первого и второго рода.

## Что такое вечный двигатель и два начала термодинамики?

а. Вечные двигатели первого и второго рода.

б. Различные формулировки второго начала.

Очевидная и понятная всем: контакт тел с разной температурой.

## Что такое вечный двигатель и два начала термодинамики?

- a. Вечные двигатели первого и второго рода.
  
- b. Различные формулировки второго начала.  
Очевидная и понятная всем: контакт тел с разной температурой.
  
- c. Зоммерфельд о соотношении двух начал (бухгалтер и директор).

## Что такое равновесное термодинамическое состояние?

a. Пример уравнения состояния газа  $PV = cT$ .

b. Температура и почему водка в градусах? (Теплород и Tempera tura.)

Закон сохранения энергии на примере газа:

$$\delta Q = dE + PdV.$$

В термодинамически равновесном состоянии внутренние параметры состояния системы (здесь газа) оказываются функциями внешних параметров (здесь он один — объём) и единственного внутреннего параметра — температуры.

Таким образом, в этой формуле  $E = E(T, V)$ ,  $P = P(T, V)$ .

## Что такое равновесное термодинамическое состояние?

- a. Пример уравнения состояния газа  $PV = cT$ .
- b. Температура и почему водка в градусах? (Теплород и Tempera tura.)

Закон сохранения энергии на примере газа:

$$\delta Q = dE + PdV.$$

В термодинамически равновесном состоянии внутренние параметры состояния системы (здесь газа) оказываются функциями внешних параметров (здесь он один — объём) и единственного внутреннего параметра — температуры.

Таким образом, в этой формуле  $E = E(T, V)$ ,  $P = P(T, V)$ .

## Что такое равновесное термодинамическое состояние?

b. Температура и почему водка в градусах? (Теплород и *Tempera tura*.)

Закон сохранения энергии на примере газа:

$$\delta Q = dE + PdV.$$

В термодинамически равновесном состоянии внутренние параметры состояния системы (здесь газа) оказываются функциями внешних параметров (здесь он один — объём) и единственного внутреннего параметра — температуры.

Таким образом, в этой формуле  $E = E(T, V)$ ,  $P = P(T, V)$ .

## Второе начало классической термодинамики и энтропия

Второе начало термодинамики, открытое Карно (1824), трудами Клаузиуса свелось к тому, что для замкнутой кривой  $\gamma$  (замкнутого цикла) в пространстве равновесных состояний имеет место замечательное равенство

$$\int_{\gamma} \frac{\delta Q}{T} = 0,$$

где  $\delta Q$  — форма притока тепла, а  $T$  — температура.

Значит, имеется такая функция состояния  $S$ , названная в 1865 году Клаузиусом энтропией, что  $\frac{\delta Q}{T} = dS$  и  $\delta Q = TdS$ . Тогда равенство  $\delta Q = dE + PdV$  приобретает вид

$$TdS = dE + PdV.$$

Для моля идеального газа с точностью до аддитивной постоянной  $S = c_V \ln T + R \ln V$ .

## Второе начало классической термодинамики и энтропия

Второе начало термодинамики, открытое Карно (1824), трудами Клаузиуса свелось к тому, что для замкнутой кривой  $\gamma$  (замкнутого цикла) в пространстве равновесных состояний имеет место замечательное равенство

$$\int_{\gamma} \frac{\delta Q}{T} = 0,$$

где  $\delta Q$  — форма притока тепла, а  $T$  — температура.

Значит, имеется такая функция состояния  $S$ , названная в 1865 году Клаузиусом энтропией, что  $\frac{\delta Q}{T} = dS$  и  $\delta Q = TdS$ . Тогда равенство  $\delta Q = dE + PdV$  приобретает вид

$$TdS = dE + PdV.$$

Для моля идеального газа с точностью до аддитивной постоянной  $S = c_V \ln T + R \ln V$ .

## Второе начало классической термодинамики и энтропия

Второе начало термодинамики, открытое Карно (1824), трудами Клаузиуса свелось к тому, что для замкнутой кривой  $\gamma$  (замкнутого цикла) в пространстве равновесных состояний имеет место замечательное равенство

$$\int_{\gamma} \frac{\delta Q}{T} = 0,$$

где  $\delta Q$  — форма притока тепла, а  $T$  — температура.

Значит, имеется такая функция состояния  $S$ , названная в 1865 году Клаузиусом энтропией, что  $\frac{\delta Q}{T} = dS$  и  $\delta Q = TdS$ . Тогда равенство  $\delta Q = dE + PdV$  приобретает вид

$$TdS = dE + PdV.$$

Для моля идеального газа с точностью до аддитивной постоянной  $S = c_V \ln T + R \ln V$ .

## Контактная форма Гиббса

Если вслед за Гиббсом ввести форму

$$\Omega = TdS - PdV - dE,$$

то можно сказать, что любой равновесный термодинамический процесс нашей системы (газа) идет вдоль нулей (ядер  $\ker \Omega$ ) формы  $\Omega$ .

Отсюда связи классической термодинамики с контактной геометрией:

Контактная структура;

Неголономные связи (конёк, парковка автомобиля).

Например, конёк на плоскости живёт в  $\mathbb{R}^3$ :  $\omega = \cos \varphi dx - \sin \varphi dy$ .

Соединимость состояний при неголономных связях и (не)интегрируемость соответствующих распределений.

(Фробениус, Гиббс, Пуанкаре, Каратеодори, Борн, Рашевский, Чоу ...)

## Контактная форма Гиббса

Если вслед за Гиббсом ввести форму

$$\Omega = TdS - PdV - dE,$$

то можно сказать, что любой равновесный термодинамический процесс нашей системы (газа) идет вдоль нулей (ядер  $\ker \Omega$ ) формы  $\Omega$ .

Отсюда связи классической термодинамики с контактной геометрией:

Контактная структура;

Неголономные связи (конёк, парковка автомобиля).

Например, конёк на плоскости живёт в  $\mathbb{R}^3$ :  $\omega = \cos \varphi dx - \sin \varphi dy$ .

Соединимость состояний при неголономных связях и (не)интегрируемость соответствующих распределений.

(Фробениус, Гиббс, Пуанкаре, Каратеодори, Борн, Рашевский, Чоу ...)

## Поведение энтропии замкнутой системы

Пример: контакт тел разной температуры, выравнивание температуры и рост энтропии.

Напомним, что

$$dS_1 = dQ_1/T_1 \quad dS_2 = dQ_2/T_2.$$

Но при контактном теплообмене двух тел

$$dQ_1 = -dQ_2$$

Поэтому, если  $T_1 < T_2$ , то

$$dS_1 + dS_2 = dQ_1/T_1 + dQ_2/T_2 = dQ(1/T_1 - 1/T_2) > 0.$$

Значит, для замкнутой термодинамической системы, состоящей из этих двух тел, имеем рост энтропии её состояния в процессе привычного выравнивания температур контактирующих тел.

## Поведение энтропии замкнутой системы

Пример: контакт тел разной температуры, выравнивание температуры и рост энтропии.

Напомним, что

$$dS_1 = dQ_1/T_1 \quad dS_2 = dQ_2/T_2.$$

Но при контактном теплообмене двух тел

$$dQ_1 = -dQ_2$$

Поэтому, если  $T_1 < T_2$ , то

$$dS_1 + dS_2 = dQ_1/T_1 + dQ_2/T_2 = dQ(1/T_1 - 1/T_2) > 0.$$

Значит, для замкнутой термодинамической системы, состоящей из этих двух тел, имеем рост энтропии её состояния в процессе привычного выравнивания температур контактирующих тел.

## Поведение энтропии замкнутой системы

Пример: контакт тел разной температуры, выравнивание температуры и рост энтропии.

Напомним, что

$$dS_1 = dQ_1/T_1 \quad dS_2 = dQ_2/T_2.$$

Но при контактном теплообмене двух тел

$$dQ_1 = -dQ_2$$

Поэтому, если  $T_1 < T_2$ , то

$$dS_1 + dS_2 = dQ_1/T_1 + dQ_2/T_2 = dQ(1/T_1 - 1/T_2) > 0.$$

Значит, для замкнутой термодинамической системы, состоящей из этих двух тел, имеем рост энтропии её состояния в процессе привычного выравнивания температур контактирующих тел.

## Поведение энтропии замкнутой системы

Пример: контакт тел разной температуры, выравнивание температуры и рост энтропии.

Напомним, что

$$dS_1 = dQ_1/T_1 \quad dS_2 = dQ_2/T_2.$$

Но при контактном теплообмене двух тел

$$dQ_1 = -dQ_2$$

Поэтому, если  $T_1 < T_2$ , то

$$dS_1 + dS_2 = dQ_1/T_1 + dQ_2/T_2 = dQ(1/T_1 - 1/T_2) > 0.$$

Значит, для замкнутой термодинамической системы, состоящей из этих двух тел, имеем рост энтропии её состояния в процессе привычного выравнивания температур контактирующих тел.

## Поведение энтропии замкнутой системы

Пример: контакт тел разной температуры, выравнивание температуры и рост энтропии.

Напомним, что

$$dS_1 = dQ_1/T_1 \quad dS_2 = dQ_2/T_2.$$

Но при контактном теплообмене двух тел

$$dQ_1 = -dQ_2$$

Поэтому, если  $T_1 < T_2$ , то

$$dS_1 + dS_2 = dQ_1/T_1 + dQ_2/T_2 = dQ(1/T_1 - 1/T_2) > 0.$$

Значит, для замкнутой термодинамической системы, состоящей из этих двух тел, имеем рост энтропии её состояния в процессе привычного выравнивания температур контактирующих тел.

О чём речь?

Напоминания и  
пояснения

Несколько слов о  
статистической  
термодинамике

• Модель  
молекулярного  
газа — вехи  
эволюции

Демон Максвелла

Чёрные дыры и  
энтропия

Литература

# Несколько слов о статистической термодинамике

## Модель молекулярного газа — вехи эволюции

1738 Д.Бернулли  $P = N \frac{2\bar{E}}{3V}$ ; 1856 Крёниг, затем Кельвин  $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ ;  
1866 Максвелл  $a \cdot \exp(-\frac{mv^2}{2kT})$ ; 1867 Больцман  $b \cdot \exp(-\frac{E}{kT})$ ; 1902 Гиббс.

Макро и микро состояния — понятия и соотношения.

Эволюция многочастичной системы в сторону более вероятного состояния и рост энтропии состояния.

Энтропия по Больцману (1872-1877?) :

$$S = k \log W .$$

Связь статистической термодинамики с многомерной геометрией и динамическими системами: Принцип концентрации меры, законы больших чисел и почему с точки зрения наблюдателя функции очень многих равноправных переменных постоянны (Максвелл, Лоренц, Пуанкаре). Динамические системы, эргодическая теория (Больцман). Случайные процессы (Эйнштейн и броуновское движение.)

За что в физике отвечает и что отражает энтропия?

Пример газа при одинаковой температуре, но в большем объёме.

Свободная энергия  $F = E - TS$ .

Неравенство Клаузиуса  $TdS \geq \delta Q$  и необратимые процессы.

## Модель молекулярного газа — вехи эволюции

1738 Д.Бернулли  $P = N \frac{2\bar{E}}{3V}$ ; 1856 Крёниг, затем Кельвин  $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ ;  
1866 Максвелл  $a \cdot \exp(-\frac{mv^2}{2kT})$ ; 1867 Больцман  $b \cdot \exp(-\frac{E}{kT})$ ; 1902 Гиббс.

Макро и микро состояния — понятия и соотношения.

Эволюция многочастичной системы в сторону более вероятного состояния и рост энтропии состояния.

Энтропия по Больцману (1872-1877?) :

$$S = k \log W .$$

Связь статистической термодинамики с многомерной геометрией и динамическими системами: Принцип концентрации меры, законы больших чисел и почему с точки зрения наблюдателя функции очень многих равноправных переменных постоянны (Максвелл, Лоренц, Пуанкаре). Динамические системы, эргодическая теория (Больцман). Случайные процессы (Эйнштейн и броуновское движение.)

За что в физике отвечает и что отражает энтропия?

Пример газа при одинаковой температуре, но в большем объёме.

Свободная энергия  $F = E - TS$ .

Неравенство Клаузиуса  $TdS \geq \delta Q$  и необратимые процессы.

## Модель молекулярного газа — вехи эволюции

1738 Д.Бернулли  $P = N \frac{2\bar{E}}{3V}$ ; 1856 Крёниг, затем Кельвин  $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ ;  
1866 Максвелл  $a \cdot \exp(-\frac{mv^2}{2kT})$ ; 1867 Больцман  $b \cdot \exp(-\frac{E}{kT})$ ; 1902 Гиббс.

Макро и микро состояния — понятия и соотношения.

Эволюция многочастичной системы в сторону более вероятного состояния и рост энтропии состояния.

Энтропия по Больцману (1872-1877?) :

$$S = k \log W .$$

Связь статистической термодинамики с многомерной геометрией и динамическими системами: Принцип концентрации меры, законы больших чисел и почему с точки зрения наблюдателя функции очень многих равноправных переменных постоянны (Максвелл, Лоренц, Пуанкаре). Динамические системы, эргодическая теория (Больцман). Случайные процессы (Эйнштейн и броуновское движение.)

За что в физике отвечает и что отражает энтропия?

Пример газа при одинаковой температуре, но в большем объёме.

Свободная энергия  $F = E - TS$ .

Неравенство Клаузиуса  $TdS \geq \delta Q$  и необратимые процессы.

## Модель молекулярного газа — вехи эволюции

1738 Д.Бернулли  $P = N \frac{2\bar{E}}{3V}$ ; 1856 Крёниг, затем Кельвин  $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ ;  
1866 Максвелл  $a \cdot \exp(-\frac{mv^2}{2kT})$ ; 1867 Больцман  $b \cdot \exp(-\frac{E}{kT})$ ; 1902 Гиббс.

Макро и микро состояния — понятия и соотношения.

Эволюция многочастичной системы в сторону более вероятного состояния и рост энтропии состояния.

Энтропия по Больцману (1872-1877?) :

$$S = k \log W .$$

Связь статистической термодинамики с многомерной геометрией и динамическими системами: Принцип концентрации меры, законы больших чисел и почему с точки зрения наблюдателя функции очень многих равноправных переменных постоянны (Максвелл, Лоренц, Пуанкаре). Динамические системы, эргодическая теория (Больцман). Случайные процессы (Эйнштейн и броуновское движение.)

За что в физике отвечает и что отражает энтропия?

Пример газа при одинаковой температуре, но в большем объёме.

Свободная энергия  $F = E - TS$ .

Неравенство Клаузиуса  $TdS \geq \delta Q$  и необратимые процессы.

О чём речь?

Напоминания и  
пояснения

Несколько слов о  
статистической  
термодинамике

Демон Максвелла

- Демон и что тут странного?
- Второе начало как неубывание энтропии замкнутой системы и Демон Максвелла
- Информация, неограниченная память и вечный двигатель второго рода

Чёрные дыры и энтропия

Литература

# Демон Максвелла

## Демон и что тут странного?

Распределение Максвелла и работа Демона.

Противоречие со вторым началом термодинамики и попытки найти первопричину противоречия.

Наивные предположения (энергия для открытия дверцы, для определения скорости молекулы...) и их последовательное устранение.

Двигатель Сциларда (Силарда) — 1929.

(Тот самый Лео Сцилард, который вместе с Вигнером и Теллером инициировал знаменитое письмо Эйнштейна 1939 года президенту Рузвельту, запустившее атомный проект в США.)

1960 - Ландауэр (IBM, компьютер как термодинамическая система);

(1980-82) - Беннет (термодинамика вычислительного процесса);

1983 - Фейнман. (физика вычислительного процесса, включая кванты);

(Идея квантового компьютера: Фейнман 1983/86, Манин 1979/80.)

1956 - Бриллюэн (Ранние исследования связи информации и энтропии).

1990 Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing

(Edited by H.S.Leff and A.F.Rex. Bristol) Обширная библиография!

## Демон и что тут странного?

Распределение Максвелла и работа Демона.

Противоречие со вторым началом термодинамики и попытки найти первопричину противоречия.

Наивные предположения (энергия для открытия дверцы, для определения скорости молекулы...) и их последовательное устранение.

Двигатель Сциларда (Силарда) — 1929.

(Тот самый Лео Сцилард, который вместе с Вигнером и Теллером инициировал знаменитое письмо Эйнштейна 1939 года президенту Рузвельту, запустившее атомный проект в США.)

1960 - Ландауэр (IBM, компьютер как термодинамическая система);

(1980-82) - Беннет (термодинамика вычислительного процесса);

1983 - Фейнман. (физика вычислительного процесса, включая кванты);

(Идея квантового компьютера: Фейнман 1983/86, Манин 1979/80.)

1956 - Бриллюэн (Ранние исследования связи информации и энтропии).

1990 Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing

(Edited by H.S.Leff and A.F.Rex. Bristol) Обширная библиография!

## Демон и что тут странного?

Распределение Максвелла и работа Демона.

Противоречие со вторым началом термодинамики и попытки найти первопричину противоречия.

Наивные предположения (энергия для открытия дверцы, для определения скорости молекулы...) и их последовательное устранение.

Двигатель Сциларда (Силарда) — 1929.

(Тот самый Лео Сцилард, который вместе с Вигнером и Теллером инициировал знаменитое письмо Эйнштейна 1939 года президенту Рузвельту, запустившее атомный проект в США.)

1960 - Ландауэр (IBM, компьютер как термодинамическая система);

(1980-82) - Беннет (термодинамика вычислительного процесса);

1983 - Фейнман. (физика вычислительного процесса, включая кванты);

(Идея квантового компьютера: Фейнман 1983/86, Манин 1979/80.)

1956 - Бриллюэн (Ранние исследования связи информации и энтропии).

1990 Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing

(Edited by H.S.Leff and A.F.Rex. Bristol) Обширная библиография!

## Демон и что тут странного?

Распределение Максвелла и работа Демона.

Противоречие со вторым началом термодинамики и попытки найти первопричину противоречия.

Наивные предположения (энергия для открытия дверцы, для определения скорости молекулы...) и их последовательное устранение.

Двигатель Сциларда (Силарда) — 1929.

(Тот самый Лео Сцилард, который вместе с Вигнером и Теллером инициировал знаменитое письмо Эйнштейна 1939 года президенту Рузвельту, запустившее атомный проект в США.)

1960 - Ландауэр (IBM, компьютер как термодинамическая система);

(1980-82) - Беннет (термодинамика вычислительного процесса);

1983 - Фейнман. (физика вычислительного процесса, включая кванты);

(Идея квантового компьютера: Фейнман 1983/86, Манин 1979/80.)

1956 - Бриллюэн (Ранние исследования связи информации и энтропии).

1990 Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing

(Edited by H.S.Leff and A.F.Rex. Bristol) Обширная библиография!

## Демон и что тут странного?

Распределение Максвелла и работа Демона.

Противоречие со вторым началом термодинамики и попытки найти первопричину противоречия.

Наивные предположения (энергия для открытия дверцы, для определения скорости молекулы...) и их последовательное устранение.

Двигатель Сциларда (Силарда) — 1929.

(Тот самый Лео Сцилард, который вместе с Вигнером и Теллером инициировал знаменитое письмо Эйнштейна 1939 года президенту Рузвельту, запустившее атомный проект в США.)

1960 - Ландауэр (IBM, компьютер как термодинамическая система);

(1980-82) - Беннет (термодинамика вычислительного процесса);

1983 - Фейнман. (физика вычислительного процесса, включая кванты);

(Идея квантового компьютера: Фейнман 1983/86, Манин 1979/80.)

1956 - Бриллюэн (Ранние исследования связи информации и энтропии).

1990 Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing

(Edited by H.S.Leff and A.F.Rex. Bristol) Обширная библиография!

## Второе начало как неубывание энтропии замкнутой системы и Демон Максвелла

---

Демон плюс его внешность — вот замкнутая система.

Неравенства  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$  и  $\delta Q \leq TdS$  Клаузиуса, и необратимые процессы.

Обратимые и необратимые операции на компьютере.

Память и её очистка. Обнуление памяти необратимо.

Уменьшается энтропия состояния памяти, но увеличивается энтропия внешности Демона и системы в целом. (При очистке памяти, как и при переработке мусора, выделяется тепло).

За очистку памяти, как за уборку мусора, приходится платить (за уборку макулатуры, использованной информации и иной духовной или материальной пищи).

## Второе начало как неубывание энтропии замкнутой системы и Демон Максвелла

---

Демон плюс его внешность — вот замкнутая система.

Неравенства  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$  и  $\delta Q \leq TdS$  Клаузиуса, и необратимые процессы.

Обратимые и необратимые операции на компьютере.

Память и её очистка. Обнуление памяти необратимо.

Уменьшается энтропия состояния памяти, но увеличивается энтропия внешности Демона и системы в целом. (При очистке памяти, как и при переработке мусора, выделяется тепло).

За очистку памяти, как за уборку мусора, приходится платить (за уборку макулатуры, использованной информации и иной духовной или материальной пищи).

## Второе начало как неубывание энтропии замкнутой системы и Демон Максвелла

---

Демон плюс его внешность — вот замкнутая система.

Неравенства  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$  и  $\delta Q \leq TdS$  Клаузиуса, и необратимые процессы.

Обратимые и необратимые операции на компьютере.

Память и её очистка. Обнуление памяти необратимо.

Уменьшается энтропия состояния памяти, но увеличивается энтропия внешности Демона и системы в целом. (При очистке памяти, как и при переработке мусора, выделяется тепло).

За очистку памяти, как за уборку мусора, приходится платить (за уборку макулатуры, использованной информации и иной духовной или материальной пищи).

## Второе начало как неубывание энтропии замкнутой системы и Демон Максвелла

---

Демон плюс его внешность — вот замкнутая система.

Неравенства  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$  и  $\delta Q \leq TdS$  Клаузиуса, и необратимые процессы.

Обратимые и необратимые операции на компьютере.

Память и её очистка. Обнуление памяти необратимо.

Уменьшается энтропия состояния памяти, но увеличивается энтропия внешности Демона и системы в целом. (При очистке памяти, как и при переработке мусора, выделяется тепло).

За очистку памяти, как за уборку мусора, приходится платить (за уборку макулатуры, использованной информации и иной духовной или материальной пищи).

## Второе начало как неубывание энтропии замкнутой системы и Демон Максвелла

---

Демон плюс его внешность — вот замкнутая система.

Неравенства  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$  и  $\delta Q \leq TdS$  Клаузиуса, и необратимые процессы.

Обратимые и необратимые операции на компьютере.

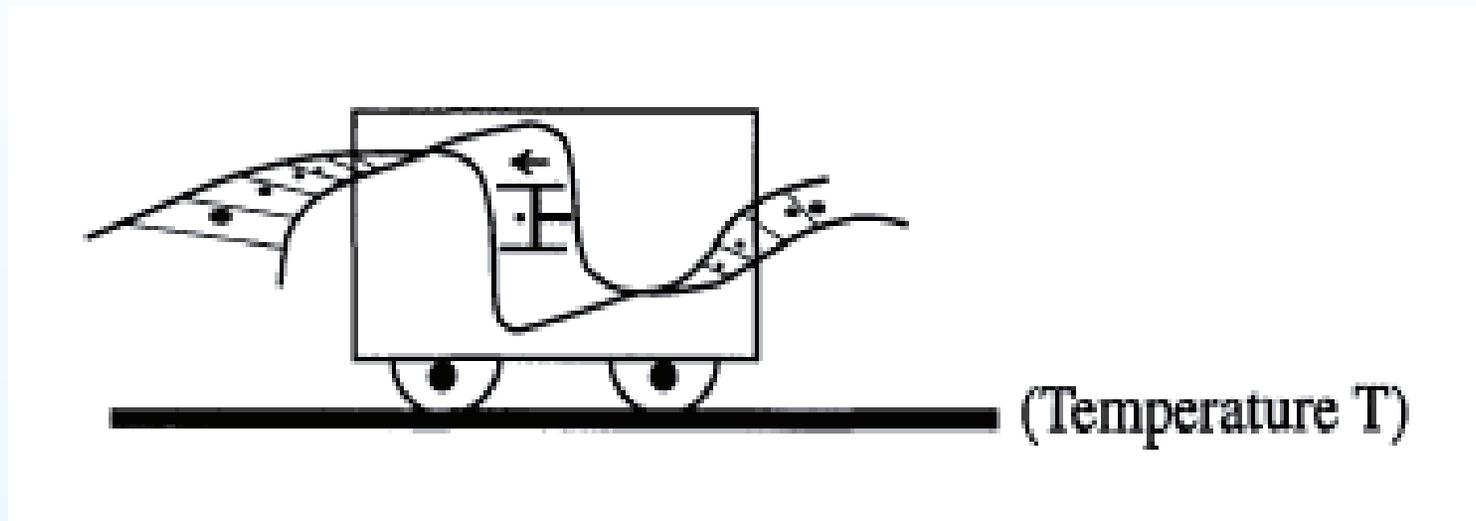
Память и её очистка. Обнуление памяти необратимо.

Уменьшается энтропия состояния памяти, но увеличивается энтропия внешности Демона и системы в целом. (При очистке памяти, как и при переработке мусора, выделяется тепло).

За очистку памяти, как за уборку мусора, приходится платить (за уборку макулатуры, использованной информации и иной духовной или материальной пищи).

# Информация, неограниченная память и вечный двигатель второго рода

Машина Тьюринга—Беннета.

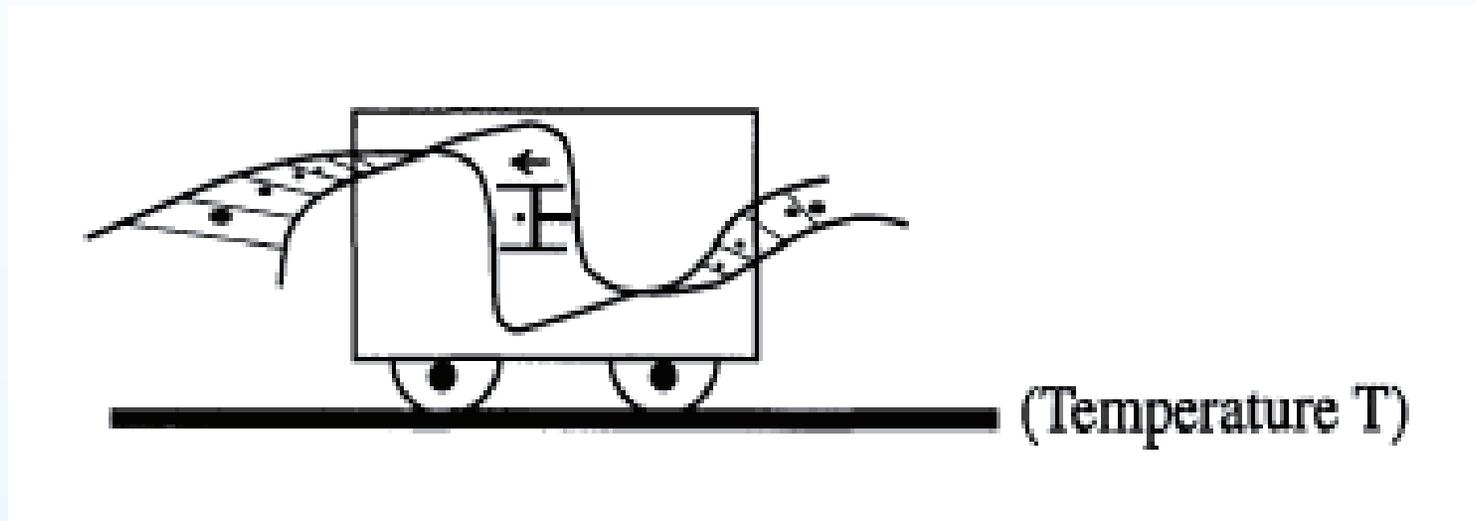


Информация и переработка тепла в работу.

Лента Фейнмана (информация и энергия).

# Информация, неограниченная память и вечный двигатель второго рода

Машина Тьюринга—Беннета.

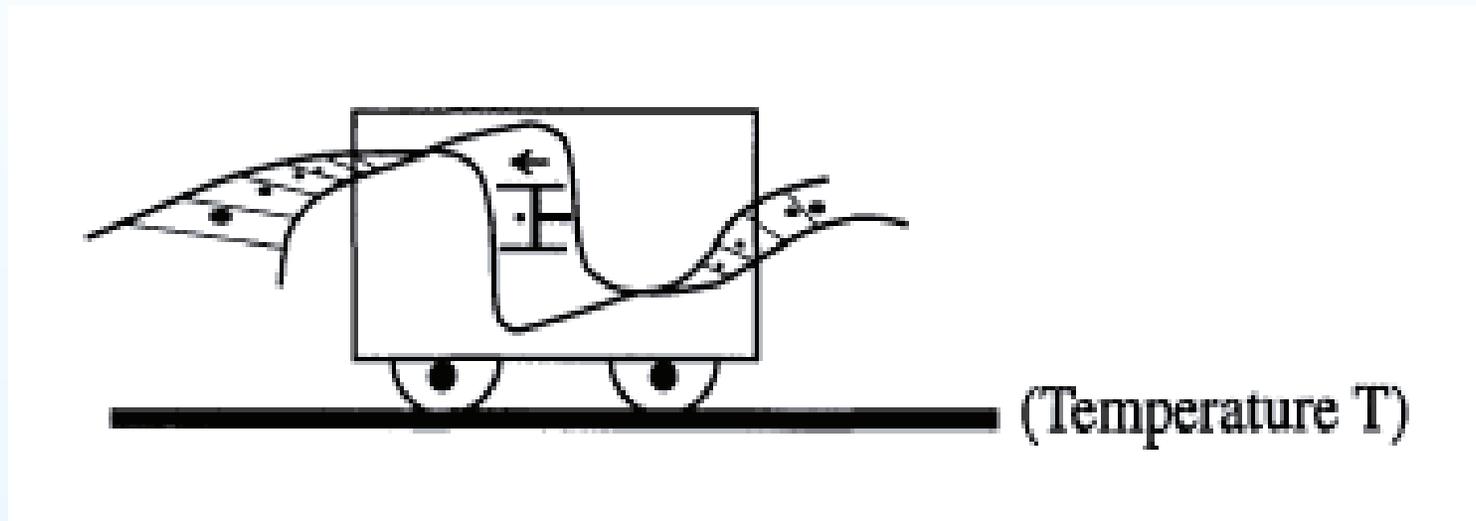


Информация и переработка тепла в работу.

Лента Фейнмана (информация и энергия).

# Информация, неограниченная память и вечный двигатель второго рода

Машина Тьюринга—Беннета.



Информация и переработка тепла в работу.

Лента Фейнмана (информация и энергия).

О чём речь?

Напоминания и  
пояснения

Несколько слов о  
статистической  
термодинамике

Демон Максвелла

Чёрные дыры и  
энтропия

• Чёрная дыра и  
горизонт событий

Литература

# Чёрные дыры и энтропия

# Чёрная дыра и горизонт событий

Горизонт событий.

Его площадь как энтропия.

Неубывание и супераддитивность (при слиянии чёрных дыр).

Чёрная дыра как Демон.

Опять конфликт со вторым началом термодинамики.

Решение Хокинга (квантовый туннельный эффект и испарение чёрных дыр).

# Чёрная дыра и горизонт событий

Горизонт событий.

Его площадь как энтропия.

Неубывание и супераддитивность (при слиянии чёрных дыр).

Чёрная дыра как Демон.

Опять конфликт со вторым началом термодинамики.

Решение Хокинга (квантовый туннельный эффект и испарение чёрных дыр).

# Чёрная дыра и горизонт событий

Горизонт событий.

Его площадь как энтропия.

Неубывание и супераддитивность (при слиянии чёрных дыр).

Чёрная дыра как Демон.

Опять конфликт со вторым началом термодинамики.

Решение Хокинга (квантовый туннельный эффект и испарение чёрных дыр).

# Чёрная дыра и горизонт событий

Горизонт событий.

Его площадь как энтропия.

Неубывание и супераддитивность (при слиянии чёрных дыр).

Чёрная дыра как Демон.

Опять конфликт со вторым началом термодинамики.

Решение Хокинга (квантовый туннельный эффект и испарение чёрных дыр).

О чём речь?

Напоминания и  
пояснения

Несколько слов о  
статистической  
термодинамике

Демон Максвелла

Чёрные дыры и  
энтропия

Литература

- Некоторые  
источники

Литература

## Некоторые источники

1. Чарлз Г. Беннет, Демоны, двигатели и второе начало термодинамики. В мире науки, 1988, 1, 52-60.
2. Л. Бриллюэн, Наука и теория информации. М., 1960.
3. Борн М., Каратеодори К., Бриллюэн Л. / Кузнецов Б.Г. (под ред.), Тамм И.Е., Гинзбург В.Л. и др. Развитие современной физики. М., 1964.
4. Л. Бриллюэн, Научная неопределённость и информация, М., 1966.
5. Д.Ландау, И.Лифшиц, Статистическая физика. Часть 1. Наука, М 1976.
6. М.А.Леонтович, Введение в термодинамику. Статистическая физика. Москва, Наука, 1983. - 416с.
7. Б.Б.Кадомцев, Динамика и информация. УФН, 164, №5, 449 (1994).
8. R.P.Feynman, Feynman Lectures on Computation. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. The Advanced Book Program, (Lectured 1983), Published 1996.
9. С.Хокинг, Р.Пенроуз, Природа пространства и времени. РХД, Удмуртский гос. университет, 2000.
10. М.Льоцци, История физики. М.: Мир, 1970.