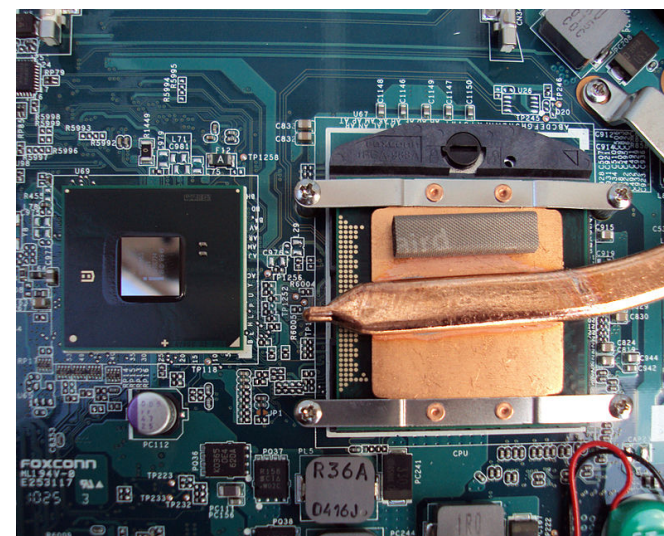
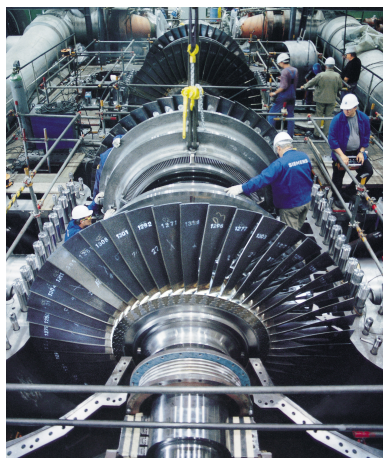
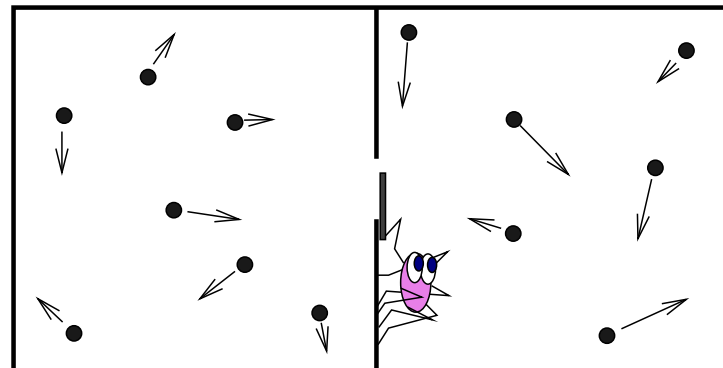


Termodynamické stroje, Maxwellův démon, teplo, práce, informace

- Tomáš Opatrný
PřF UP Olomouc



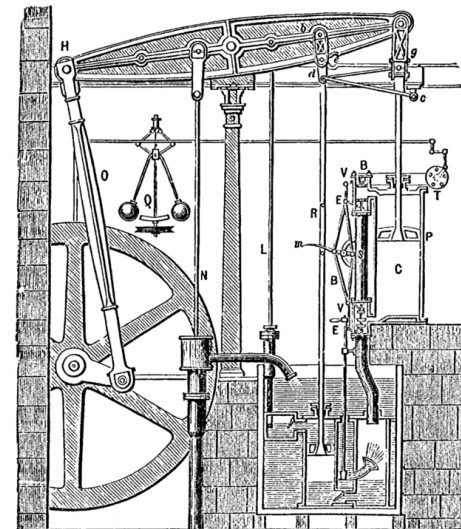
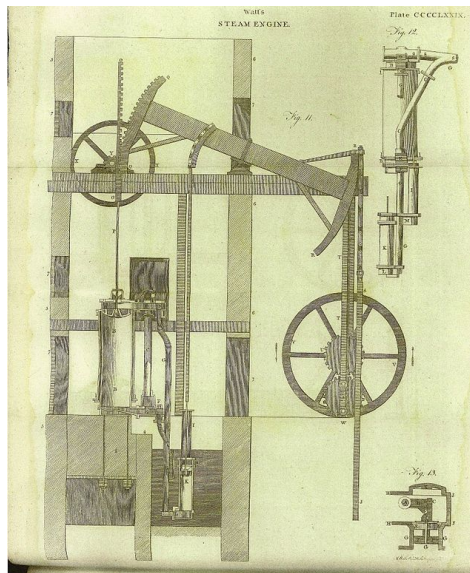
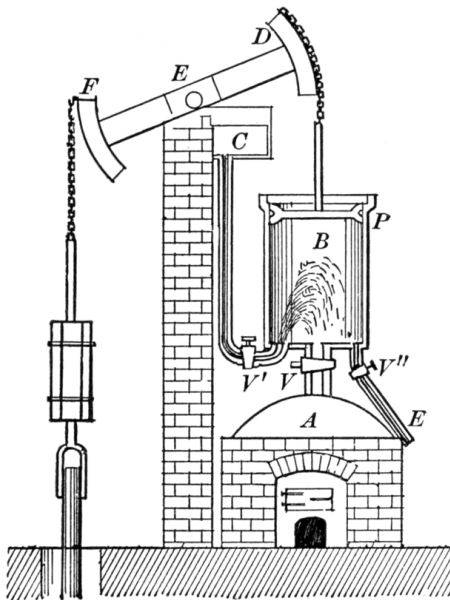
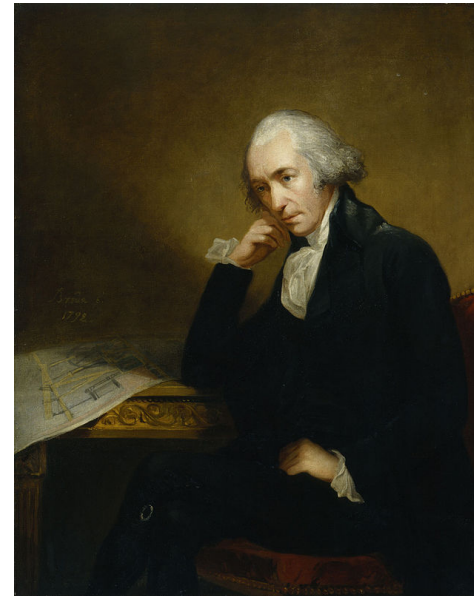
Termodynamické stroje, Maxwellův démon, teplo, práce, informace

Obsah

1. Od tepla k práci aneb "pohybová síla ohně"
2. Teplo, entropie a jednosměrná cesta světa
3. Maxwellův démon: uspořádáním snížíme entropii?
4. Entropie a život
5. Entropie a informace
6. Energie, entropie, informace a vývoj vesmíru

James Watt: parní stroje

- Vylepšení Newcomenova stroje (čerpání vody z šachet)
- Zavedení pojmu "koňská síla" (horse power)
- 1781 planetový převod



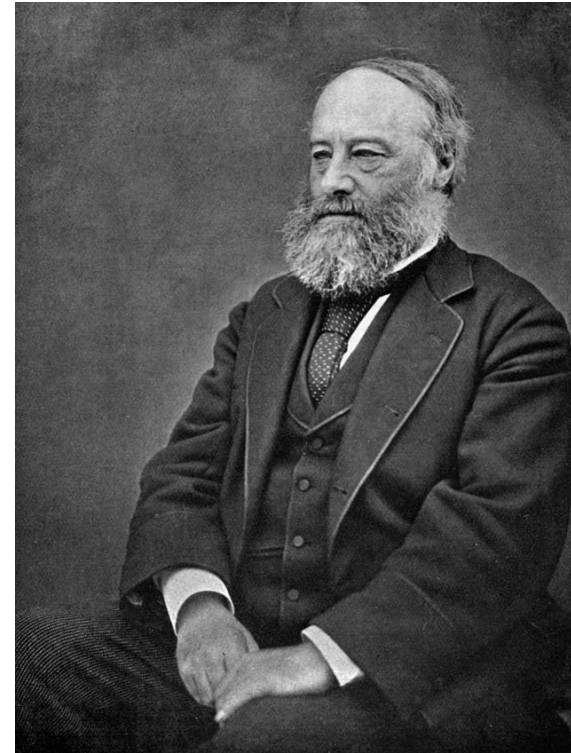
Sadi Carnot: jak zefektivnit tepelné stroje?

- Nahradit páru něčím jiným?
- Teplo: druh látky, "kalorikum", které přetéká z jednoho tělesa na druhé a může při tom vykonat práci. Kalorikum se zachovává. . .
- 1824: spis "Úvahy nad pohybovou silou ohně"
- "Pohybová síla tepla nezávisí na materiálu, ale pouze na teplotách těles, která si teplo vyměňují."



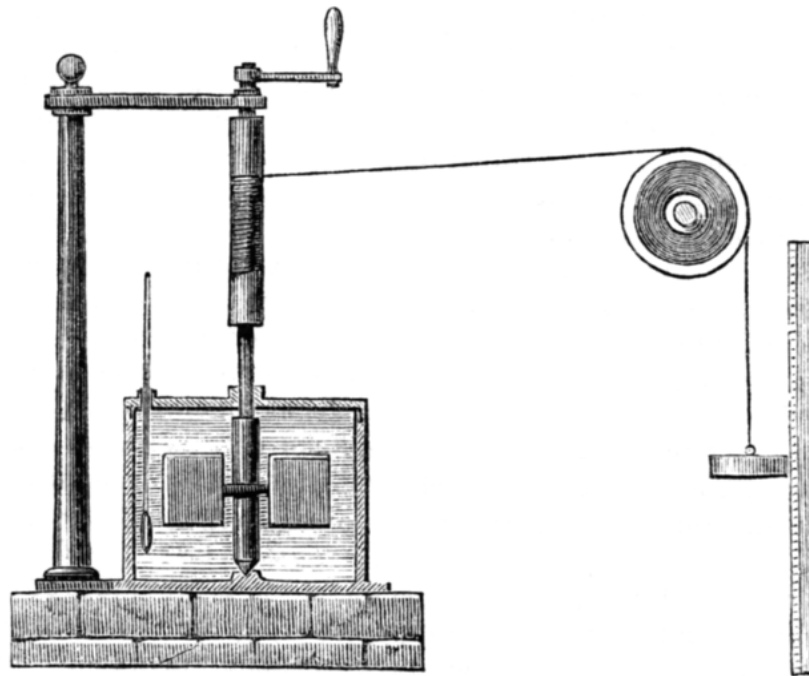
James Joule: ekvivalence tepla a práce

- kolem 1840: vyplatí se v pivovaru náhrada parních strojů za elektromotory?
- 1841: kolik tepla může vyrobit elektřina?
- 1843: tepelný ekvivalent práce. "Wherever mechanical force is expended, an exact equivalent of heat is always obtained."



James Joule: ekvivalence tepla a práce

Na ohřátí jedné libry vody o jeden stupeň Fahrenheita je zapotřebí 772 libro-stop práce.



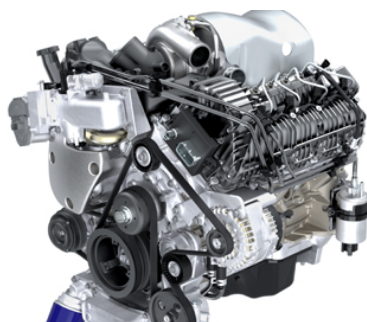
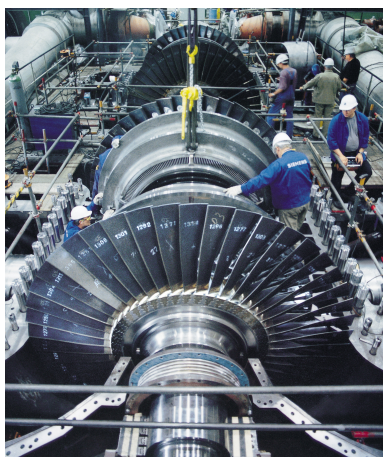
První termodynamický zákon

- Rudolf Clausius, 1850
- Zachování energie: změna vnitřní energie odpovídá výměně tepla a práce
- $U = Q - W$



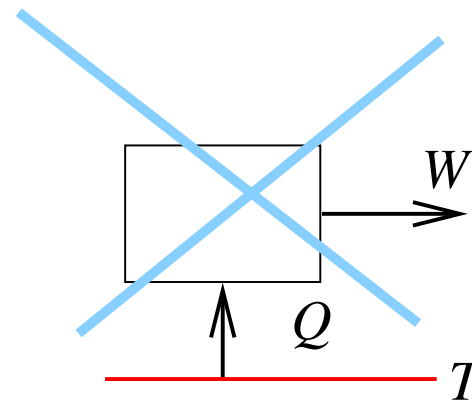
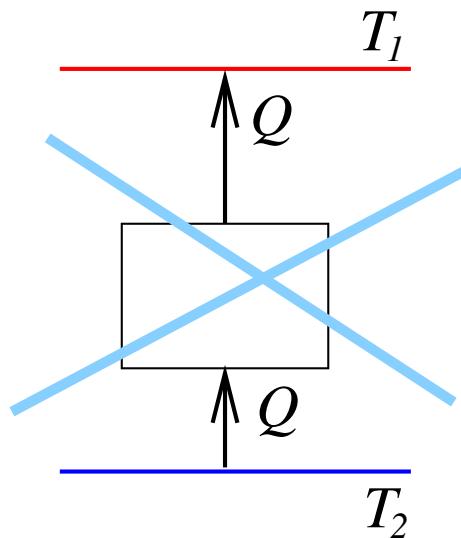
Vždy lze přeměnit práci na teplo.

Dá se vždy nějak přeměnit teplo na práci?



Druhý termodynamický zákon

- Rudolf Clausius, 1854: Teplo nemůže přecházet z chladnějšího tělesa na teplejší, aniž by docházelo zároveň k dalším změnám.
- Entropie: $\Delta S \geq Q/T$
- Kelvin: Nelze získat práci pouze ochlazováním těles.



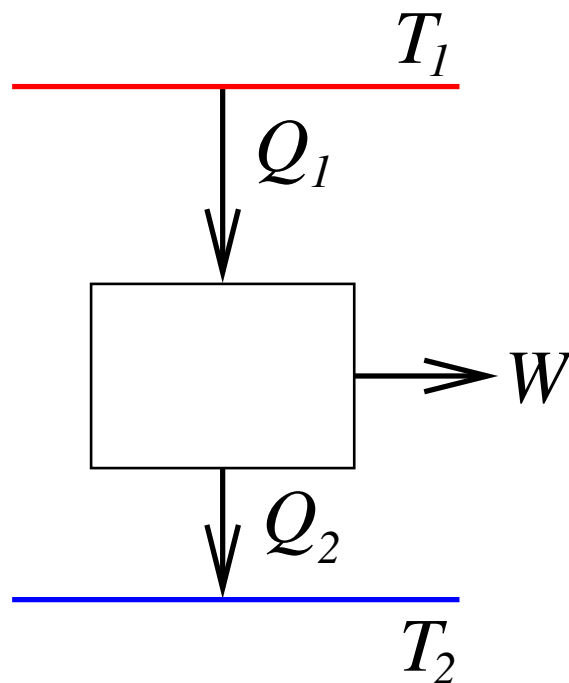
Druhý termodynamický zákon

- V izolovaných soustavách entropie stále roste
- Vše spěje k vyrovnávání teplot
- Povede to k "tepelné smrti vesmíru"?
- Může být vesmír nekonečně starý?

Druhý termodynamický zákon

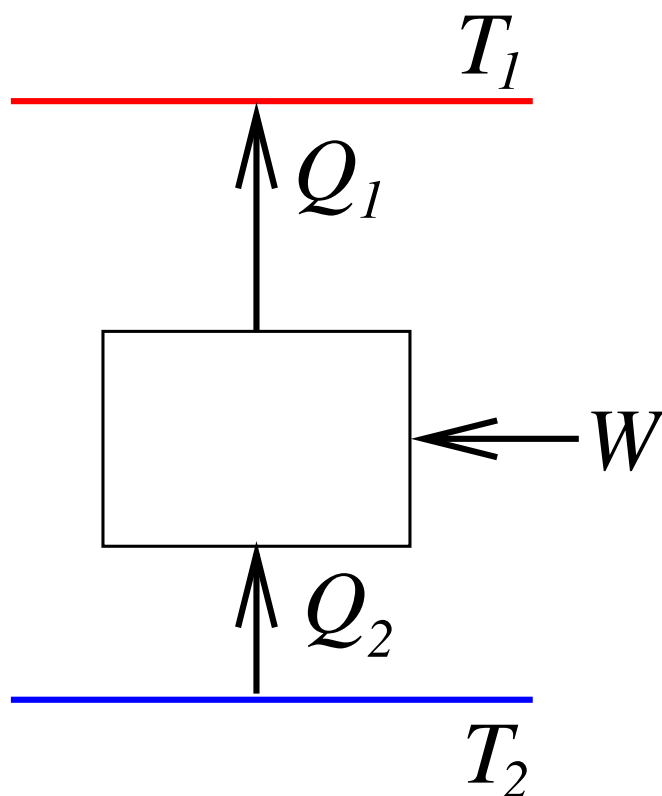
- Pro získání práce nutno část odebraného tepla předat do cladiče.
- Nejvyšší možná účinnost

$$\eta_{\max} = \frac{W_{\max}}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



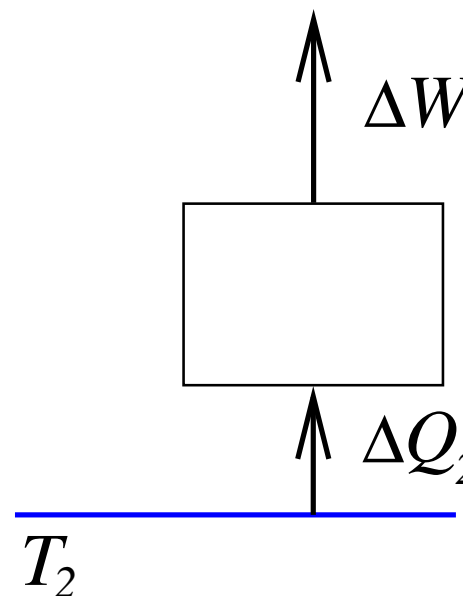
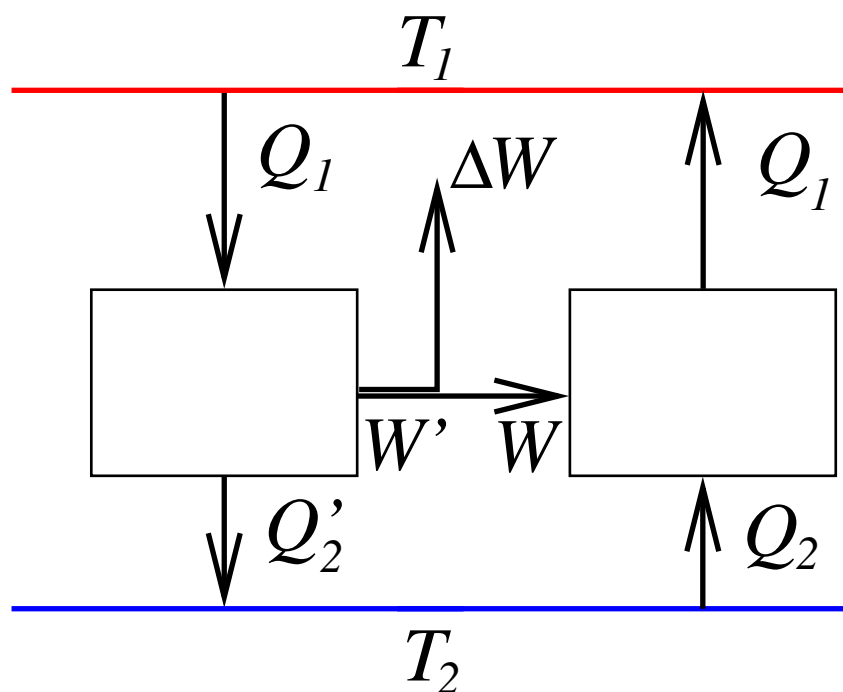
Druhý termodynamický zákon

- Může to fungovat i naopak: lze čerpat teplo z chladnějších těles na teplejší.
- Ale vždy je nutné k tomu vynaložit práci



Druhý termodynamický zákon

- Vratně pracující stroj musí mít největší možnou účinnost



Pozn. Teorém: peklo musí být izotermní.

Druhý termodynamický zákon

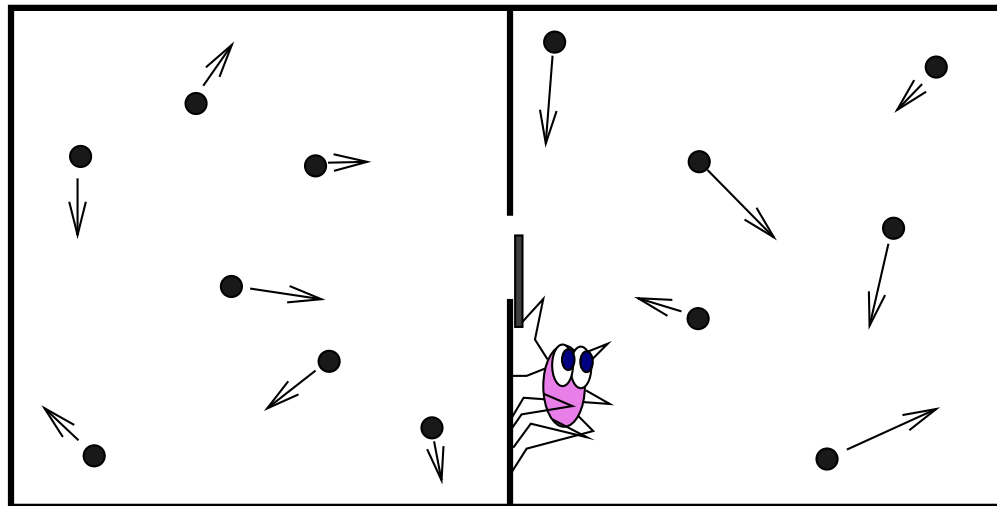
- Teplo souvisí s chaotickým pohybem molekul
- Entropie souvisí s neuspořádaností soustavy
- Ludwig Boltzmann: $S = k \ln W$



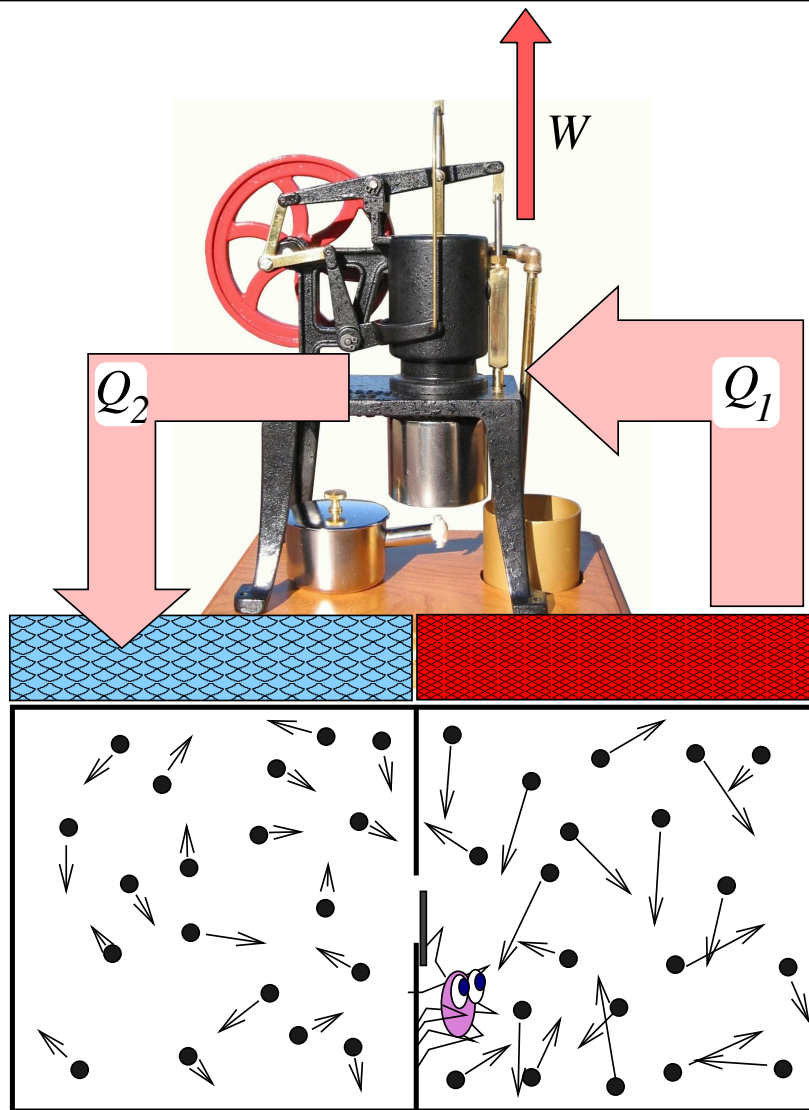
Maxwellův démon



- J.C. Maxwell, 1871
- třídění molekul podle rychlostí
- vychýlení z teplotní rovnováhy → narušení druhého termodynamického zákona?

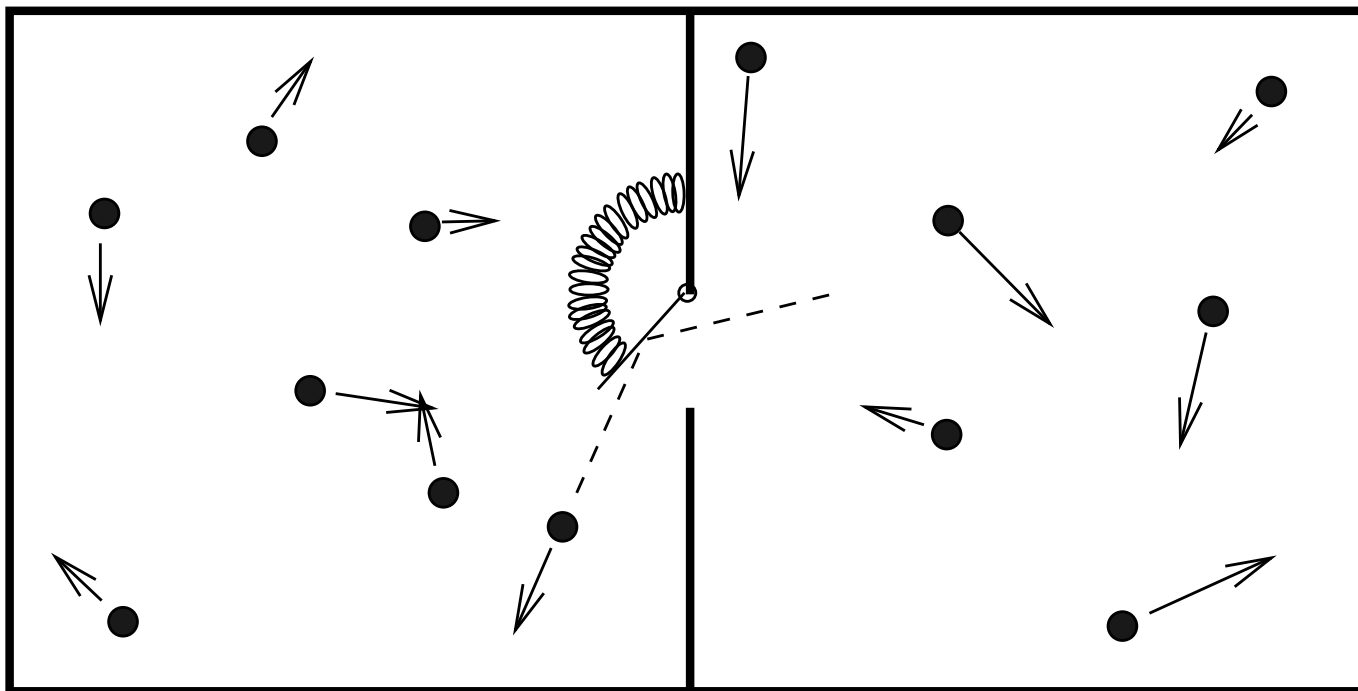


Maxwellův démon



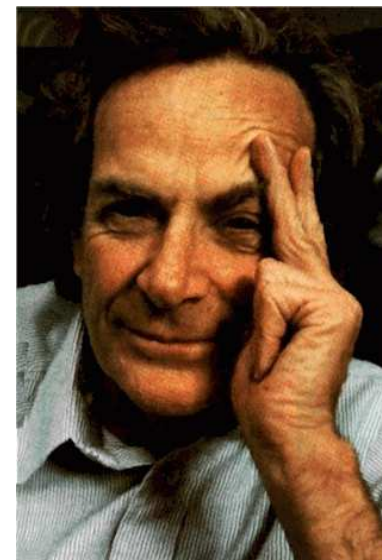
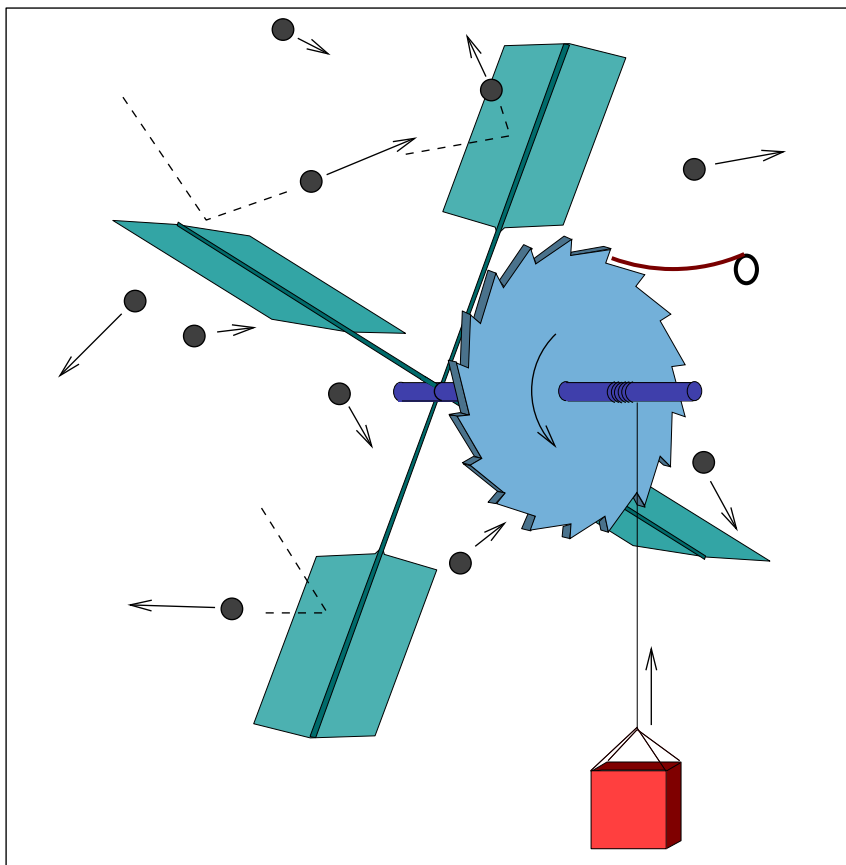
Maxwellův démon - možnosti automatického třídění molekul

Jednosměrná dvířka



Maxwellův démon - možnosti automatického třídění molekul

Kolečko se západkou (Feynmanovy přednášky z fyziky)



Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen.

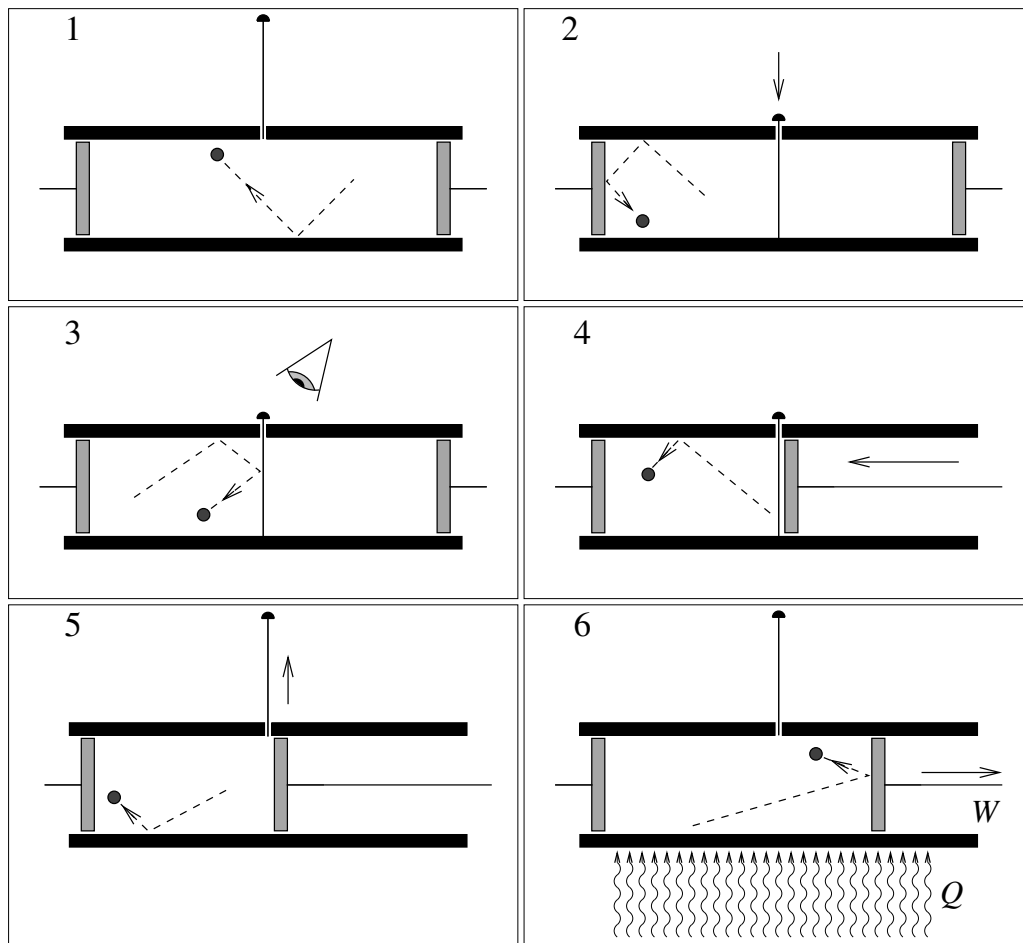
Von L. Szilard in Berlin.

Mit 1 Abbildung. (Eingegangen am 18. Januar 1928.)

Es wird untersucht, durch welche Umstände es bedingt ist, daß man scheinbar ein Perpetuum mobile zweiter Art konstruieren kann, wenn man ein Intellekt besitzendes Wesen Eingriffe an einem thermodynamischen System vornehmen läßt. Indem solche Wesen Messungen vornehmen, erzeugen sie ein Verhalten des Systems, welches es deutlich von einem sich selbst überlassenen mechanischen System unterscheidet. Wir zeigen, daß bereits eine Art Erinnerungsvermögen, welches ein System, in dem sich Messungen ereignen, auszeichnet, Anlaß zu einer dauernden Entropieverminderung bieten kann und so zu einem Verstoß gegen den zweiten Hauptsatz führen würde, wenn nicht die Messungen selbst ihrerseits notwendig unter Entropieerzeugung vor sich gehen würden. Zunächst wird ganz universell diese Entropieerzeugung aus der Forderung errechnet, daß sie im Sinne des zweiten Hauptsatzes eine volle Kompensation darstellt [Gleichung (1)]. Es wird dann auch an Hand einer unbelebten Vorrichtung, die aber (unter dauernder Entropieerzeugung) in der Lage ist, Messungen vorzunehmen, die entstehende Entropiemenge berechnet und gefunden, daß sie gerade so groß ist, wie es für die volle Kompensation notwendig ist: die wirkliche Entropieerzeugung bei der Messung braucht also nicht größer zu sein, als es Gleichung (1) verlangt.

Maxwellův démon

Szilardova verze Maxwellova démona (1929)



$$W = k_B T \ln 2$$

Může to fungovat???

Možné odpovědi:

- Museli bychom mít technologie schopné pracovat na úrovni jednotlivých molekul. To nebude nikdy možné ve velkém měřítku.
- Nikdy neříkej nikdy. Pokrok v nanotechnologiích je velký, jednou bychom to mohli zvládnout.
- Ale druhý termodynamický zákon to přece zakazuje. Nikdo nesmí porušovat druhý termodynamický zákon.
- U řady „přírodních zákonů“ se později zjistilo, že mají omezenou platnost. Ukáže se to i u druhého termodynamického zákona.

Maxwellův démon vs. 2. termodynamický zákon

The law that entropy always increases, –the second law of thermodynamics–holds, I think, the supreme position among the laws of Nature. If someone points out to you that your pet theory of the universe is in disagreement with Maxwell's equations–then so much the worse for Maxwell's equations. If it is found to be contradicted by observation– well, these experimentalists bungle things sometimes. But if your theory is found to be against the second law of thermodynamics I can give you no hope; there is nothing for it but to collapse in deepest humiliation.

A. Eddington, *The Nature of the Physical World*, (London: J.M. Dent & Sons 1935).



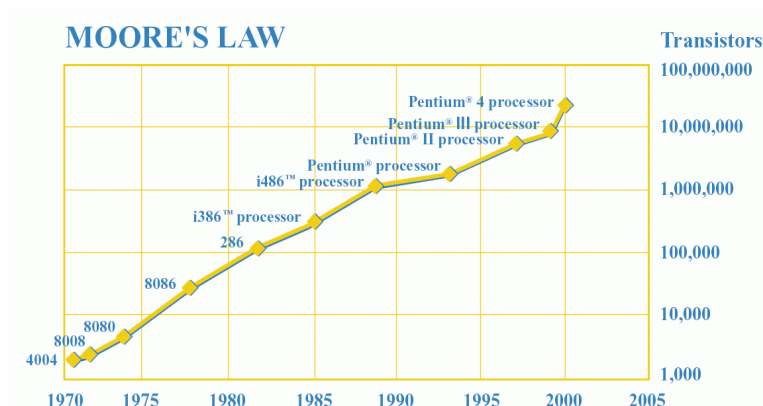
Entropie a život

- Erwin Schrödinger, "What is Life", 1944
- genetická informace uložena v "aperiodickém krystalu"
- organismy se živí "negativní entropií"



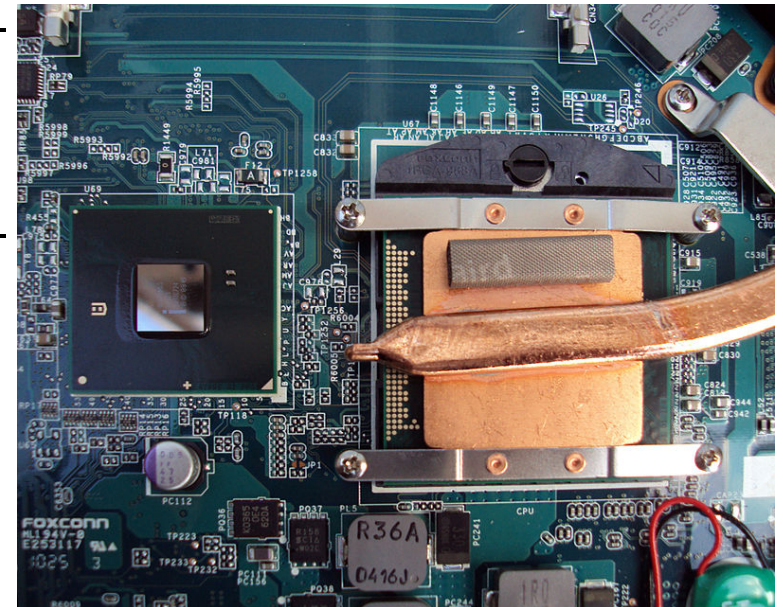
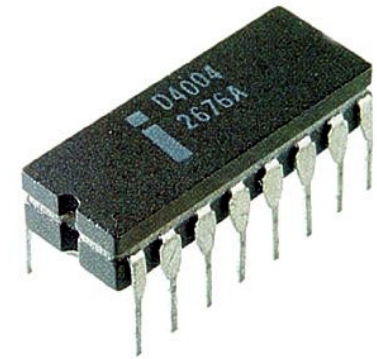
Entropie a počítače: Moorův zákon

- Gordon Moore, 1965: počet tranzistorů na čipu se každým rokem zdvojnásobuje. Spekulace: možná to bude ještě několik let pokračovat až k 60 tisíc tranzistorů...?
- Počty tranzistorů se zdvojnásobí každých cca ~ 18 měsíců.
- 1989: Intel486 1 200 000 transistorů
- 2004: Itanium 590 000 000 transistorů
- Počet atomů na čipu $\sim 100\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
- Nyní experimenty s jednoatomovými tranzistory
- Jaké jsou fyzikální meze počítání?



Entropie a počítače

- Počítače spotřebovávají elektrinu a zahřívají okolí.
- Jaké jsou minimální energetické nároky na zpracování informace?
- Kolik se spotřebuje na přenášení, kopírování, sčítání, násobení a mazání bitů?

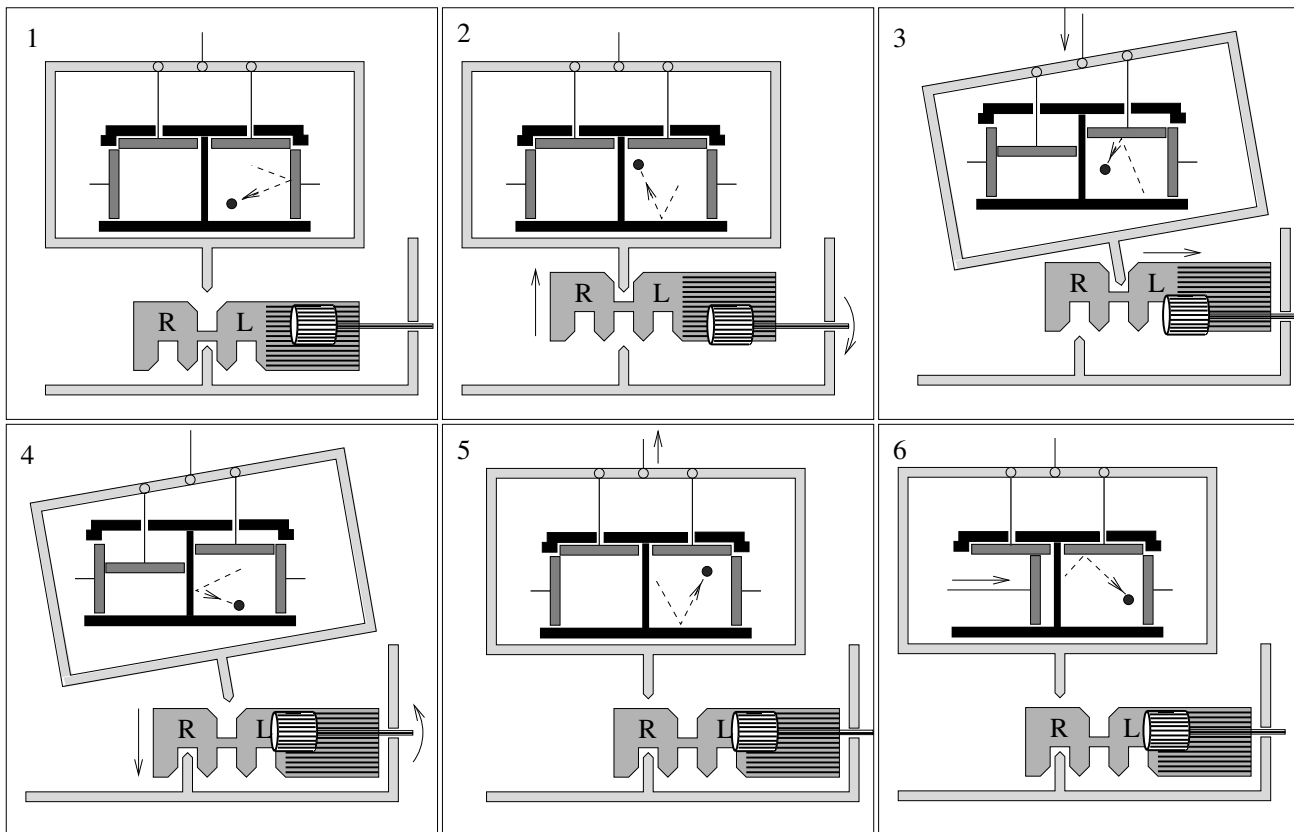


Maxwellův démon

Szilardova verze Maxwellova démona (1929)



- Leo Szilard: problém je v měření polohy. Vždy disipace energie.
- Charles Bennett (1982): měřit lze vratně. Tady problém není!



Maxwellův démon vs. Landauerův princip

Problém je v nulování paměti!

- **Landauerův princip:** při nulování neznámých bitů se disipuje energie. Množství znehodnocené energie nutné na vynulování každého bitu při teplotě okolí T je alespoň $k_B T \ln 2$.
- Maxwellův démon může pracovat jen dokud zcela nezaplní svou paměť.
- Pokud chceme jeho paměť vynulovat při stejné teplotě, při jaké pracoval stroj, musíme znehodnotit alespoň tolik energie, kolik práce nám umožnil získat.



Rolf Landauer (1927-1999)

Entropie v kosmických škálách

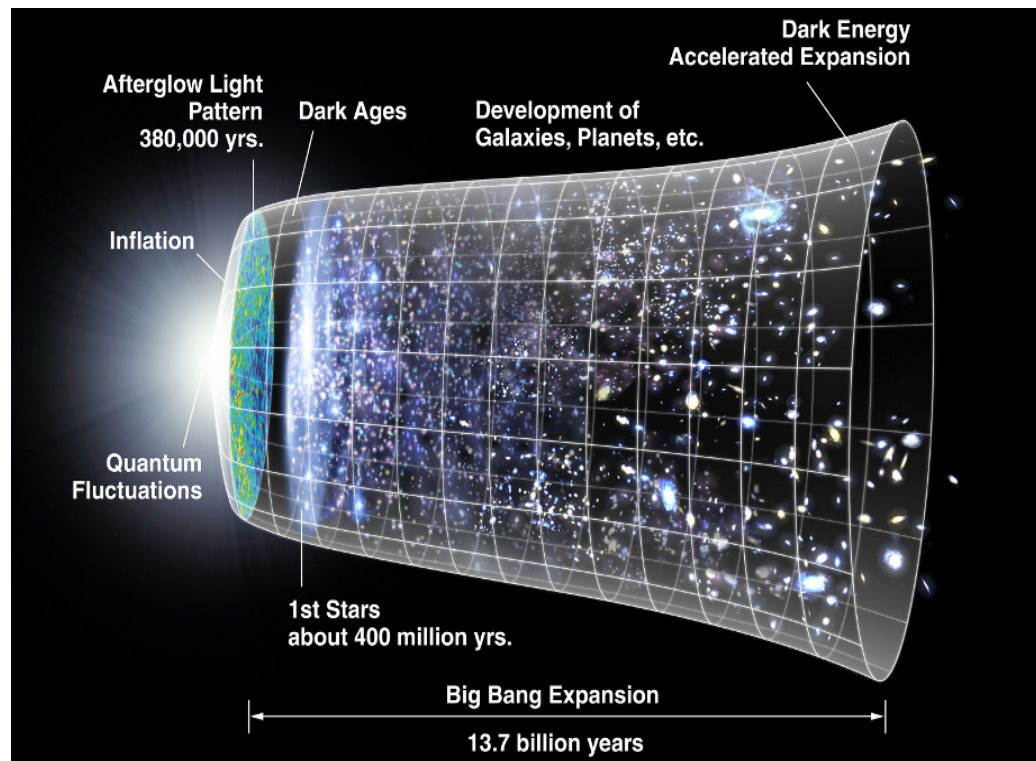
Produkce entropie:

- Člověk (za celý život): 10^9 J/K
- Země (za celou dobu existence): 10^{32} J/K
- Slunce (za celou dobu existence): 10^{40} J/K
- Pokud by sluneční hmota byla stlačena do černé díry: 10^{54} J/K
- Pokud dvě černé díry o stejné hmotnosti splynou, celková entropie se zdvojnásobí!

Můžeme získat práci místo entropie?

Vývoj vesmíru

- Velký třesk, inflace
- Vliv temné hmoty a temné energie
- Osud hvězd a pozdější stadia vesmíru?



Rekapitulace

- Překvapení 19. století: ekvivalence práce a tepla
- Vývoj světa: vždy k růstu entropie
- Problém Maxwellova démona: uspořádání systému na mikroúrovni. Řešení: až si démon zaplní paměť, musíme vynaložit práci na její vynulování
- Informace je vždy fyzikální. Mazání paměti disipuje energii
- Živíme se negativní entropií
- Jak se bude vyvíjet vesmír a tak to souvisí s entropií?

Děkuji za pozornost

