



# Termodynamika – od tepelných strojů přes Maxwellova démona po Interstellar a život u černých děr

Tomáš Opatrný

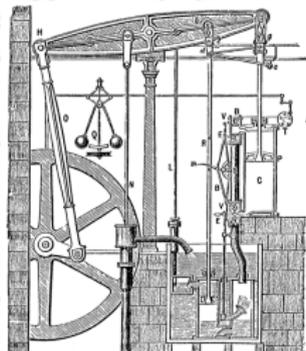
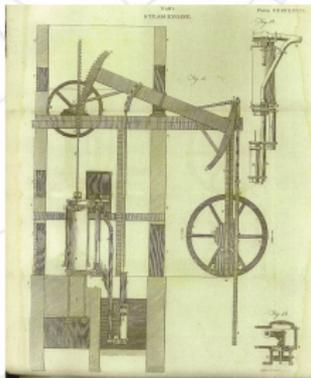
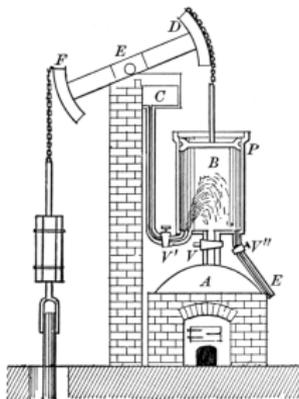
Přírodovědecká fakulta UP Olomouc

26. ledna 2018

- Od tepla k práci aneb "pohybová síla ohně"
- Teplo, entropie a jednosměrná cesta světa
- Maxwellův démon: uspořádáním snížíme entropii?
- Entropie a život
- Entropie a informace
- Energie, entropie, informace a vývoj vesmíru
- Život pod "černým sluncem" a Interstellar

## James Watt: parní stroje

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

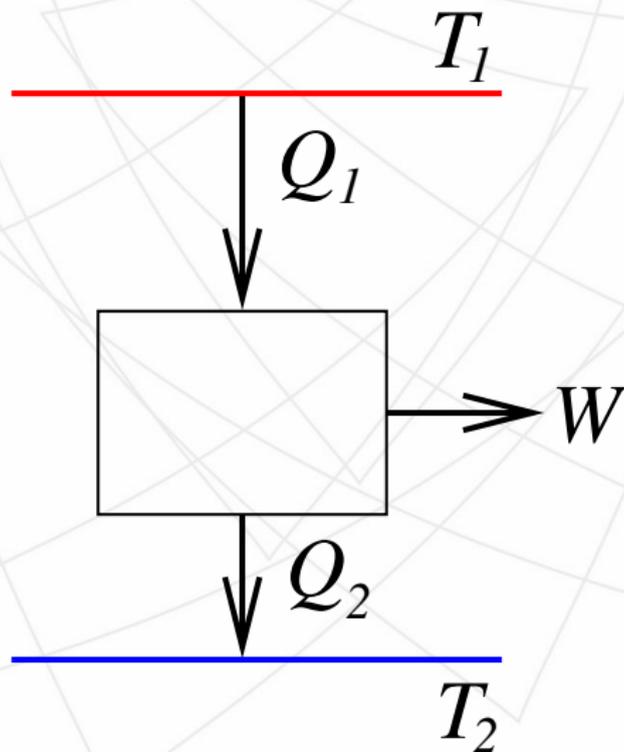


## Sadi Carnot: jak zefektivnit tepelné stroje?

- Nahradit páru něčím jiným?
- Teplo: je to druh látky? ("kalorikum")
- 1824: "Úvahy nad pohybovou silou ohně"
- "Pohybová síla tepla nezávisí na materiálu, ale pouze na teplotách těles, která si teplo vyměňují."

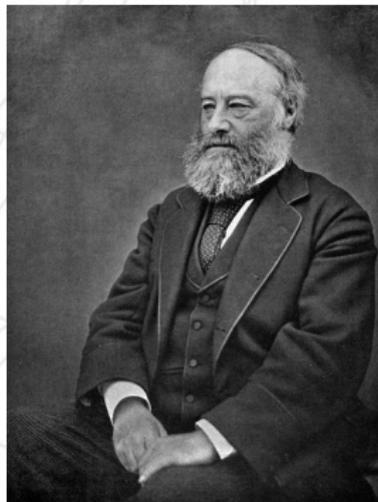


Sadi Carnot: jak zefektivnit tepelné stroje?



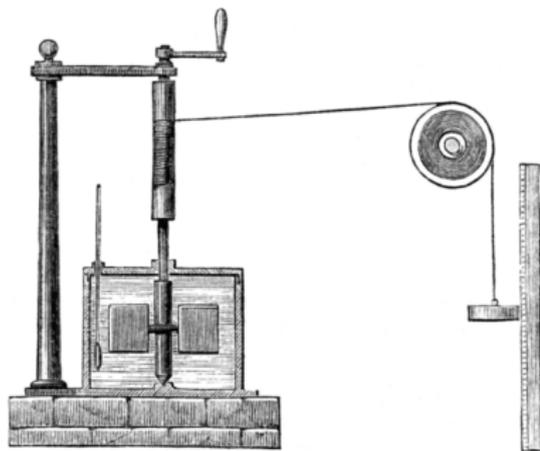
## James Joule: ekvivalence tepla a práce

- 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
- $\Delta U = Q - W$



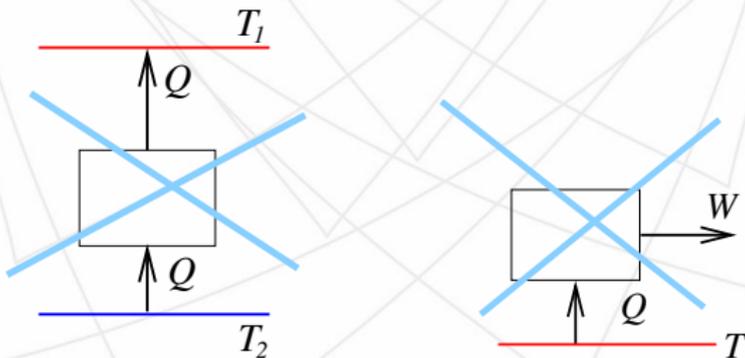
**Vždy lze přeměnit práci na teplo.**

**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 ochlazením těles.



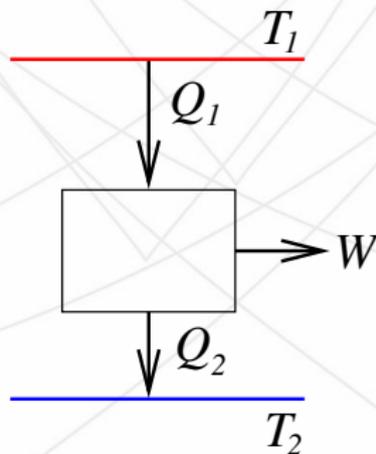
## Druhý termodynamický zákon

- 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

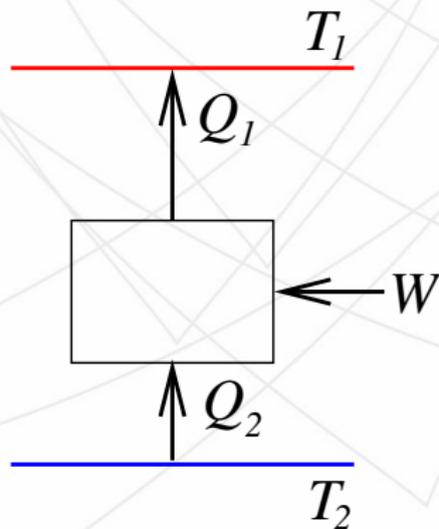
- Pro získání práce nutno část odebraného tepla předat do chladiče.
- Nejvyšší možná účinnost

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



## 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

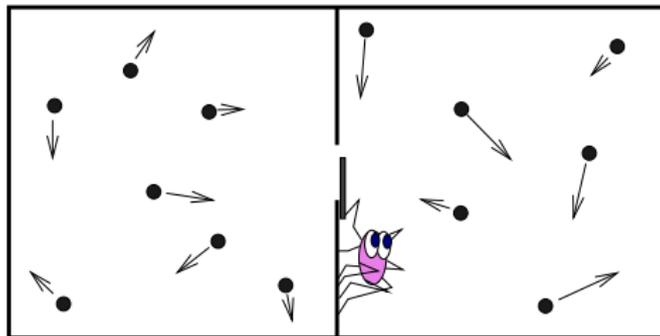
- Teplo souvisí s chaotickým pohybem molekul
- Entropie souvisí s neuspořádaností soustavy
- Ludwig Boltzmann:  $S = k \ln W$



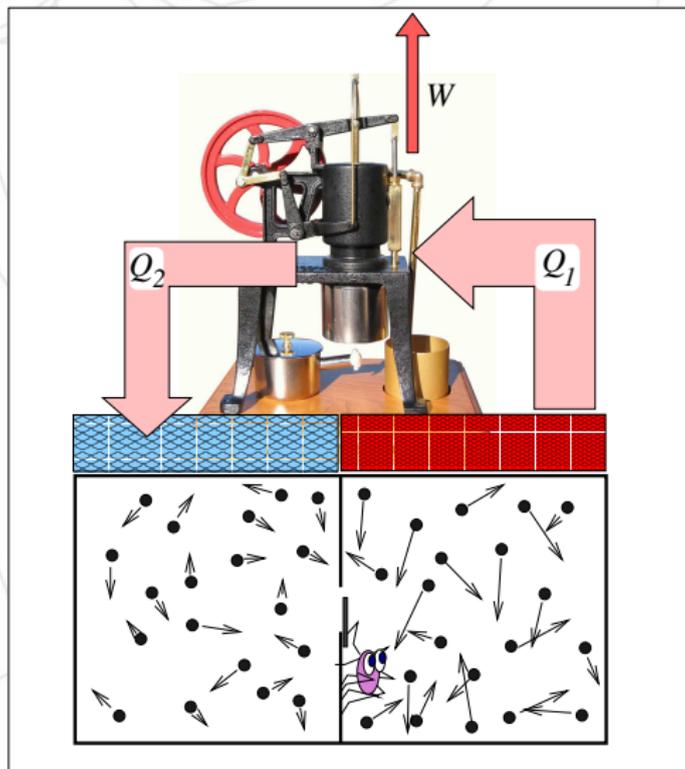
## Maxwellův démon



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



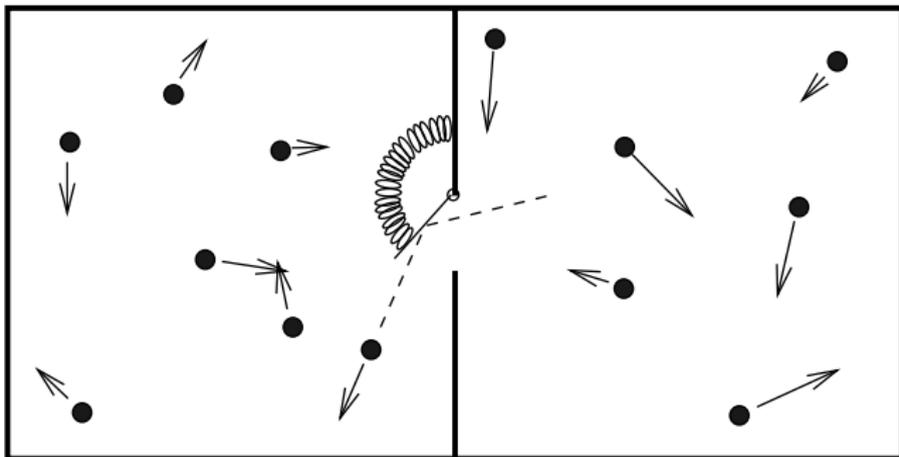
# Maxwellův démon: uspořádáním snížíme entropii?



# Maxwellův démon: uspořádáním snížíme entropii?

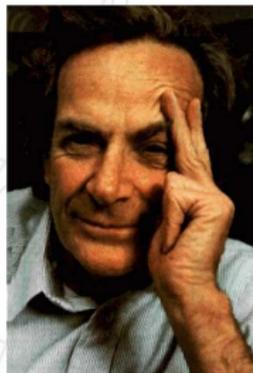
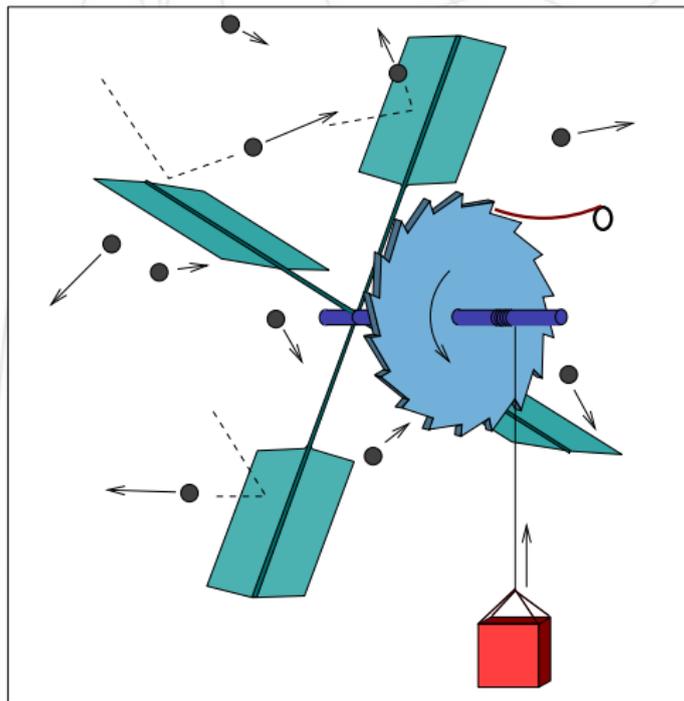
Možnosti automatického třídění molekul?

Jednosměrná dvířka



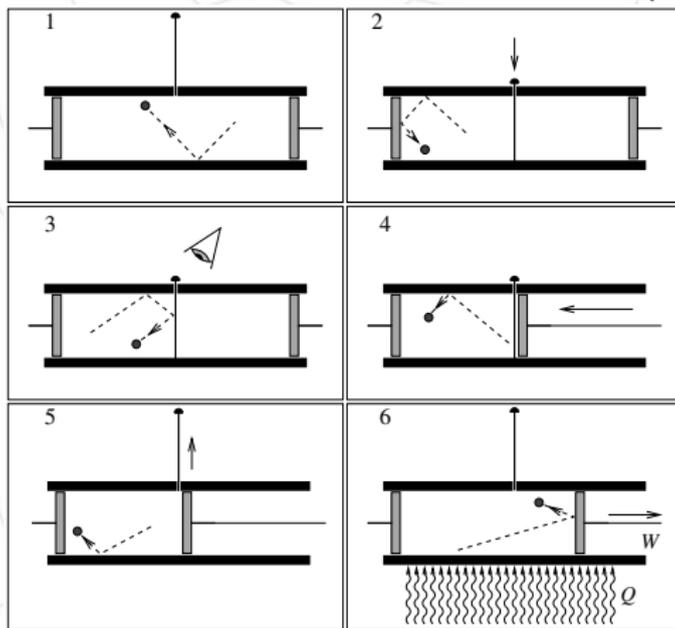
# Maxwellův démon: uspořádáním snížíme entropii?

Kolečko se západkou (Feynmanovy přednášky z fyziky)



# Maxwellův démon: uspořádáním snížíme entropii?

## 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: uspořádáním snížíme entropii?

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).

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

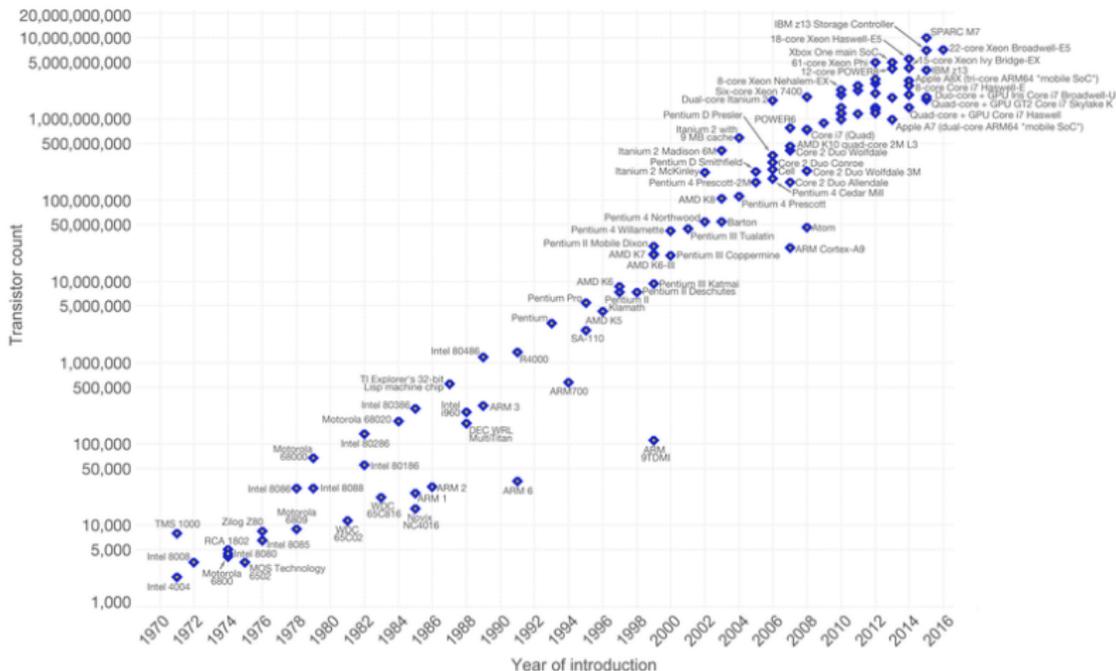


## Moorův zákon

### Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2016)

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are strongly linked to Moore's law.

Our World  
in Data



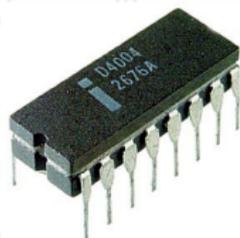
Data source: Wikipedia ([https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_count](https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count))

The data visualization is available at [OurWorldinData.org](https://ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

## Entropie a počítače

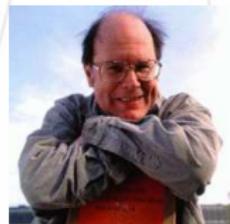
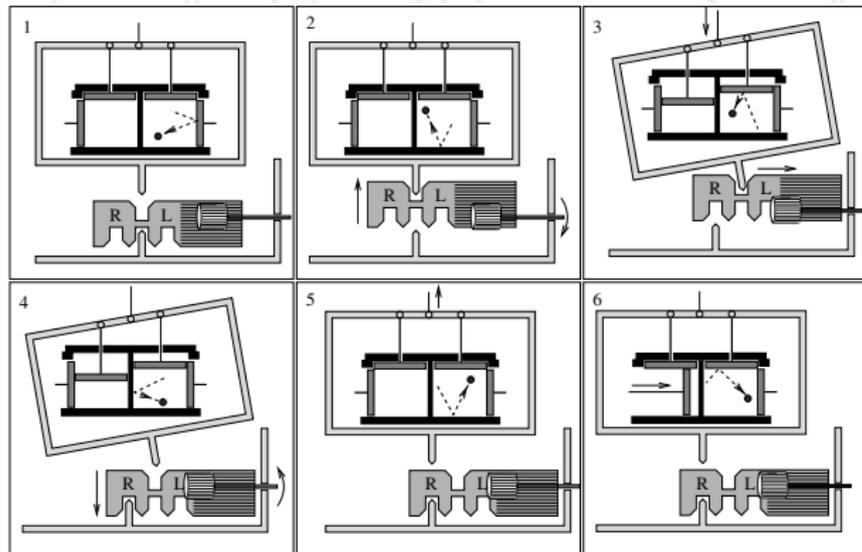
- Počítače spotřebovávají elektřinu a zahřívají okolí.
- Jaké jsou minimální energetické nároky na zpracování informace?
- Kolik se spotřebuje na přenášení, kopírování, sčítání, násobení a mazání bitů?



## Szilardova verze Maxwelllova démona (1929)



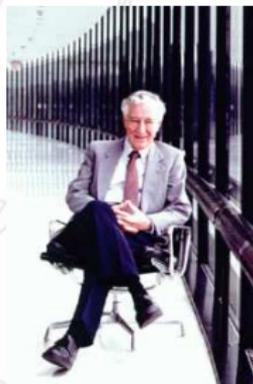
- Leo Szilard: problém je v měření polohy. Vždy disipace energie.
- Charles Bennett (1982): měřit lze vratně. Tady problém není!



## Maxwellův démon vs. Landauerův princip

### Problém je v nulování paměti!

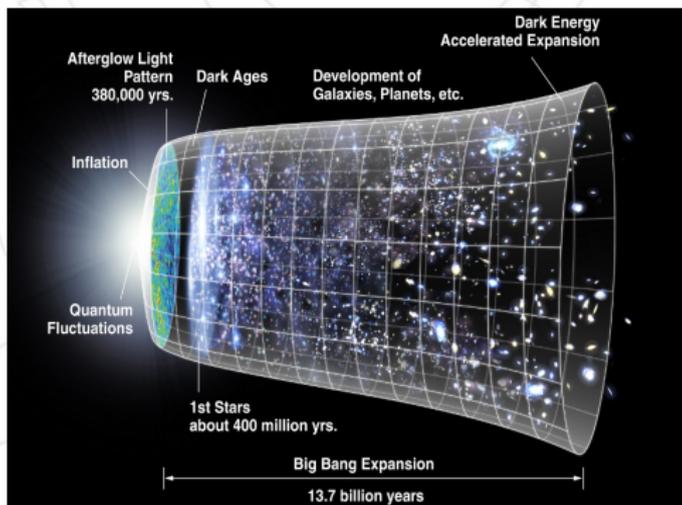
- **Landauerův princip:** při nulování neznámých bitů se znehodnocuje energie:  $kT \ln 2$ .
- Maxwellův démon může pracovat jen dokud zcela nezaplní svou paměť.
- **Informace je fyzická!**



**Rolf Landauer**  
(1927-1999)

## Vývoj vesmíru

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

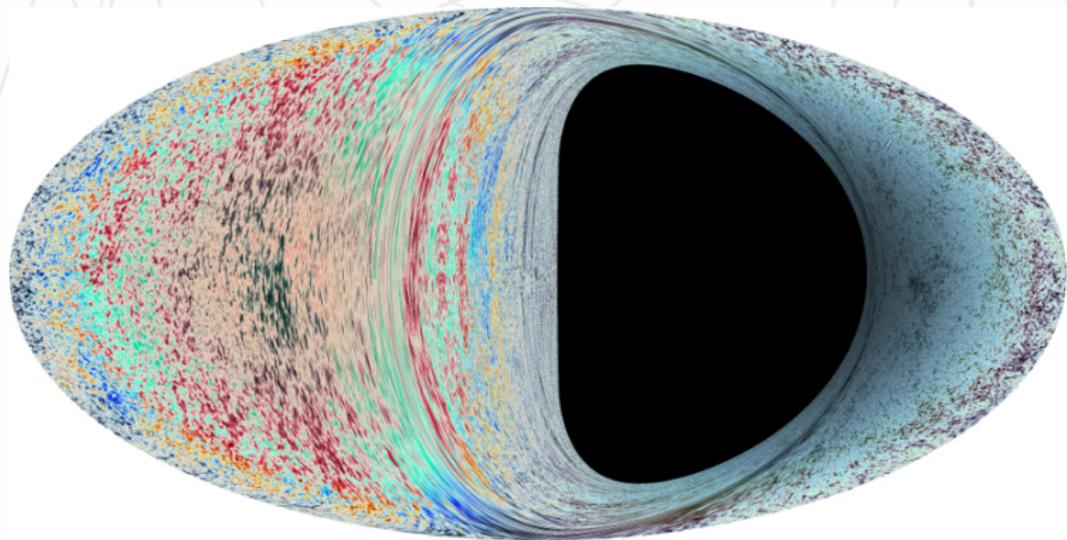


# Život pod černým sluncem



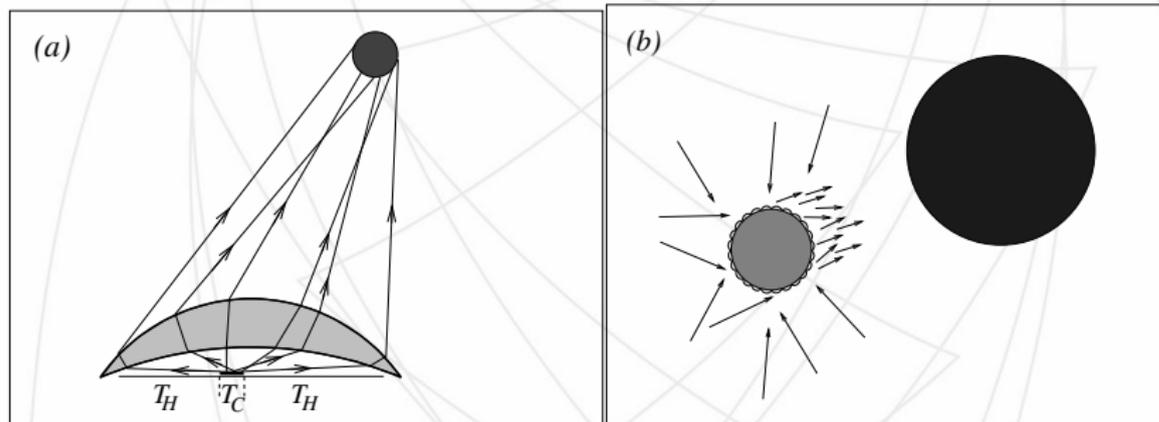
Život na Zemi je možný díky kontrastu mezi horkým sluncem a chladnou oblohou.

# Život pod černým sluncem



Svět naruby: místo horkého slunce mějme chladnou černou díru, přičemž obloha je “teplá” (2,725 K reliktní záření).

# Život pod černým sluncem



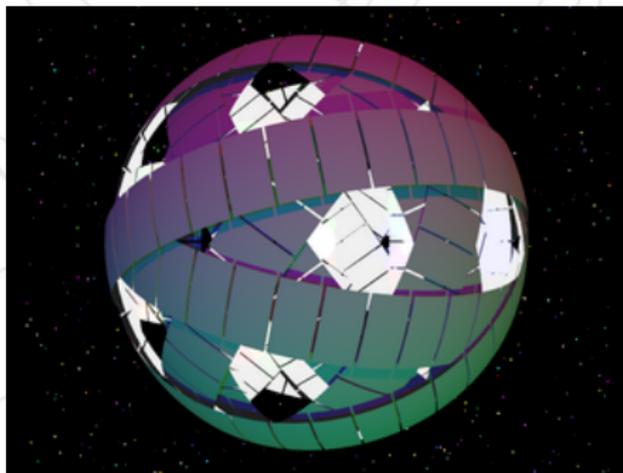
Planeta přijímá reliktní záření z okolního vesmíru, část jeho energie přemění na práci, odpadní teplo odchází do černé díry.

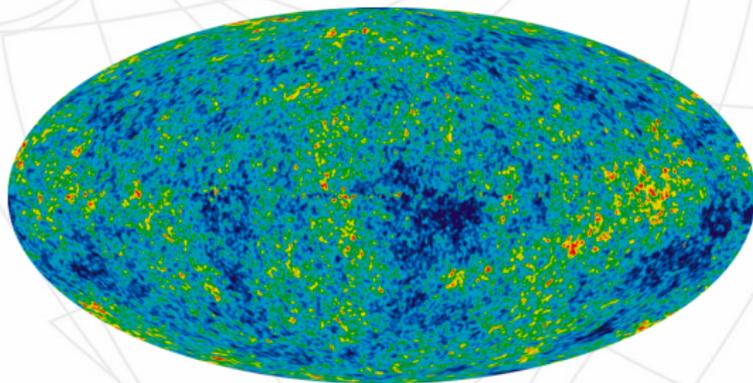
Země poblíž nerotující černé díry — max. 19 MW.

[T.O., L. Richterek, P. Bakala, American Journal of Physics 2017]

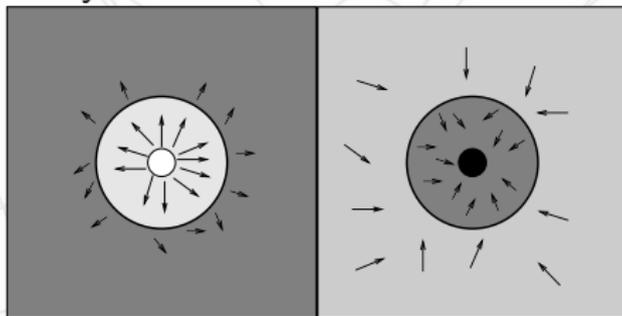
## Dysonova sféra s černou dírou

- 1960, Freeman Dyson spekoval o hledání vyspělých mimozemských civilizací, které kolem své hvězdy postaví kouli pohlcující veškeré záření.
- Detekujme jejich odpadní infračervené záření...





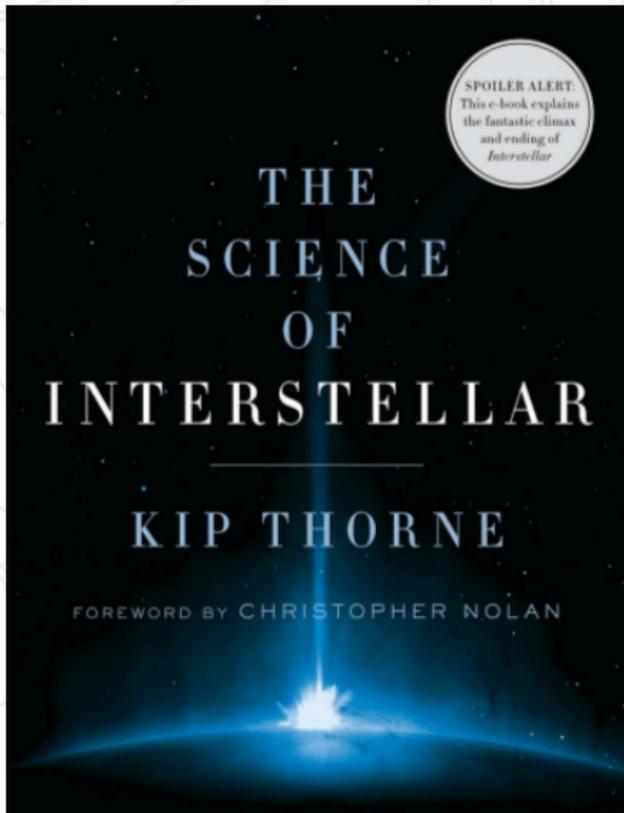
Dysonova sféra s černou dírou:



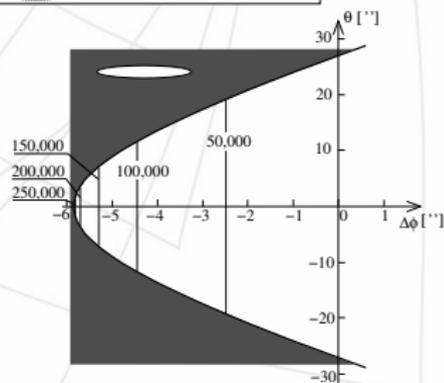
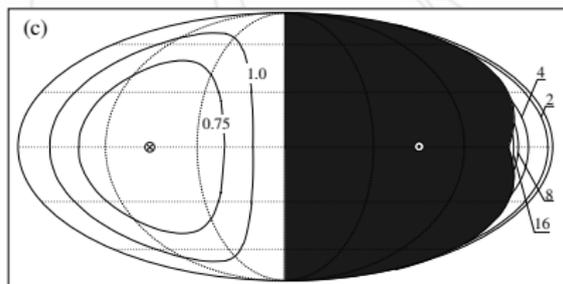
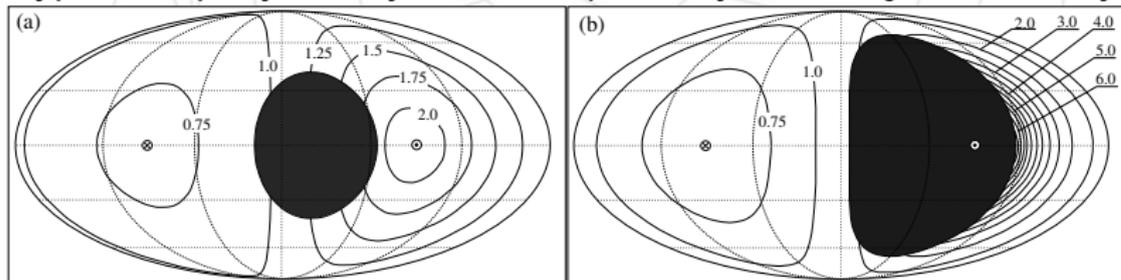
# Život pod černým sluncem

Jak by to vypadalo poblíž rotující černé díry? Inspirace z filmu Interstellar





Výpočet teploty oblohy na orbitě poblíž rychle rotující černé díry



# Život pod černým sluncem

Na planetě Millerové by bylo velmi teplo!



**New Scientist**

HOME NEWS TECHNOLOGY SPACE PHYSICS HEALTHY EARTH PLANNING LIFE TRIPS EVENTS JOBS MAGAZINE

Home | News | Life | Space

f t e + 408

DAILY NEWS 19 January 2016

## Black hole sun could support bizarre life on orbiting planets



**IFL SCIENCE!**

Like 25M Follow 185K followers + Share More

SPACE

## Life Could Exist On Planets Around Black Holes, Claims Paper

January 23, 2016 | by Jonathan O'Callaghan



## Elämää mustan

Maailmankaikkeuden lopussa pimeässä universumissa viipijälle yhä kalseammaksi käyvä kosminen taustasäteily. Yllättäen se saattaa jopa ylläpitää elämää. Joulukuussa julkaistiin tutkimus elämän viimeisistä oljenkorsista – taustasäteilyistä ja mustista aukoista.

TEKSTI MARKUS NOTAKAINEN



00:01, 25 января 2016

## Под мертвым солнцем

*Вблизи черных дыр допустили существование жизни*



- 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?
- Jak by vypadal život pod černým sluncem?

Děkuji za pozornost

