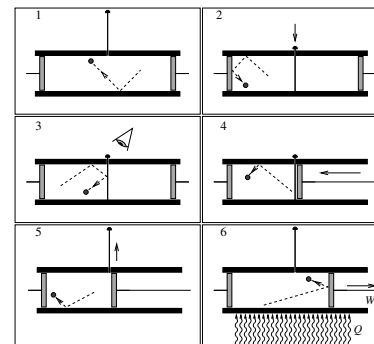


Informace a termodynamika: tepelné stroje, od molekul po černé díry

- Tomáš Opatrný
PřF UP Olomouc
- Opava 2. 12. 2011



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Informace a termodynamika: tepelné stroje, od molekul po černé díry

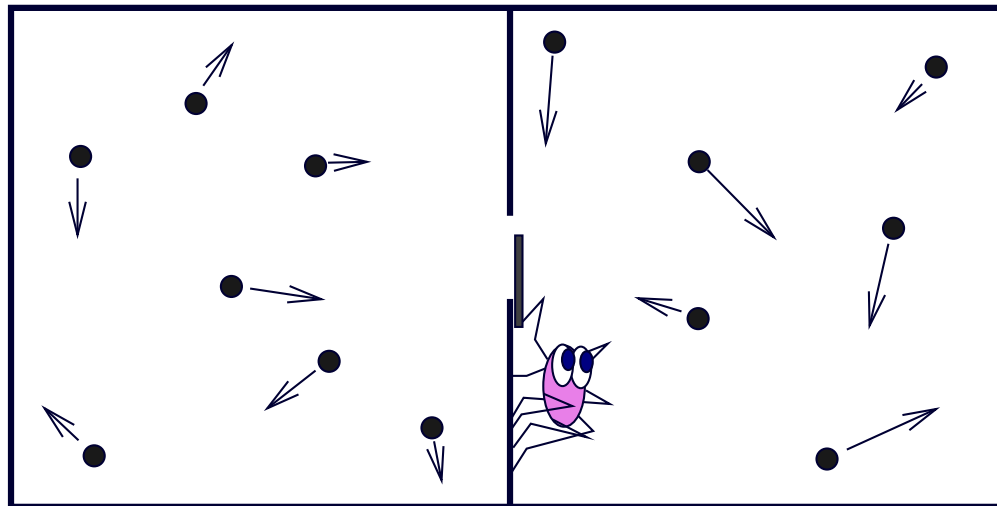
Obsah

1. Maxwellův démon a některé jeho modely
2. Szillardův stroj
3. Maser jako reverzibilní tepelný stroj
4. Liboffův třicestný model
5. Tepelný stroj s černými dírami

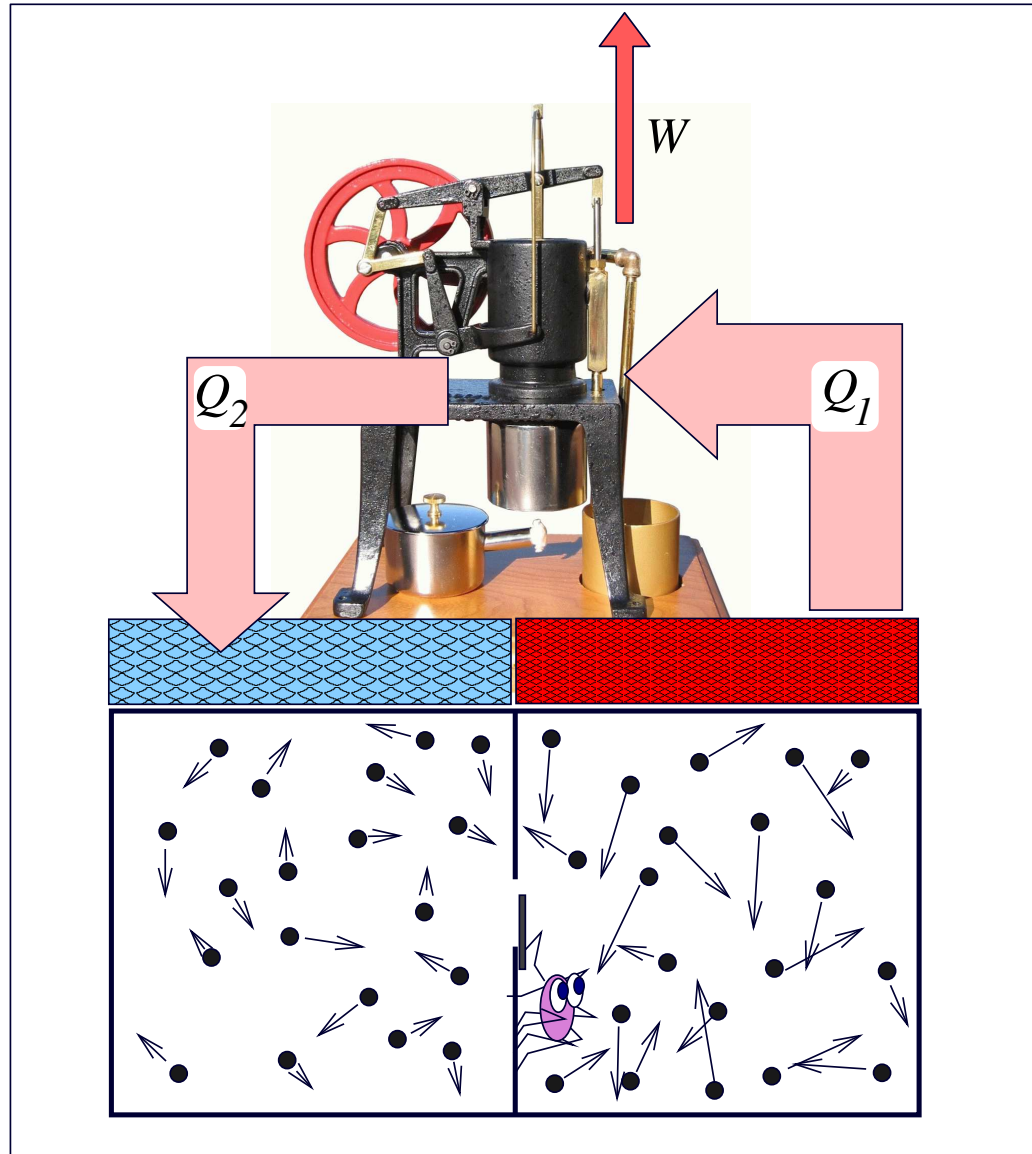
Maxwellův démon



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

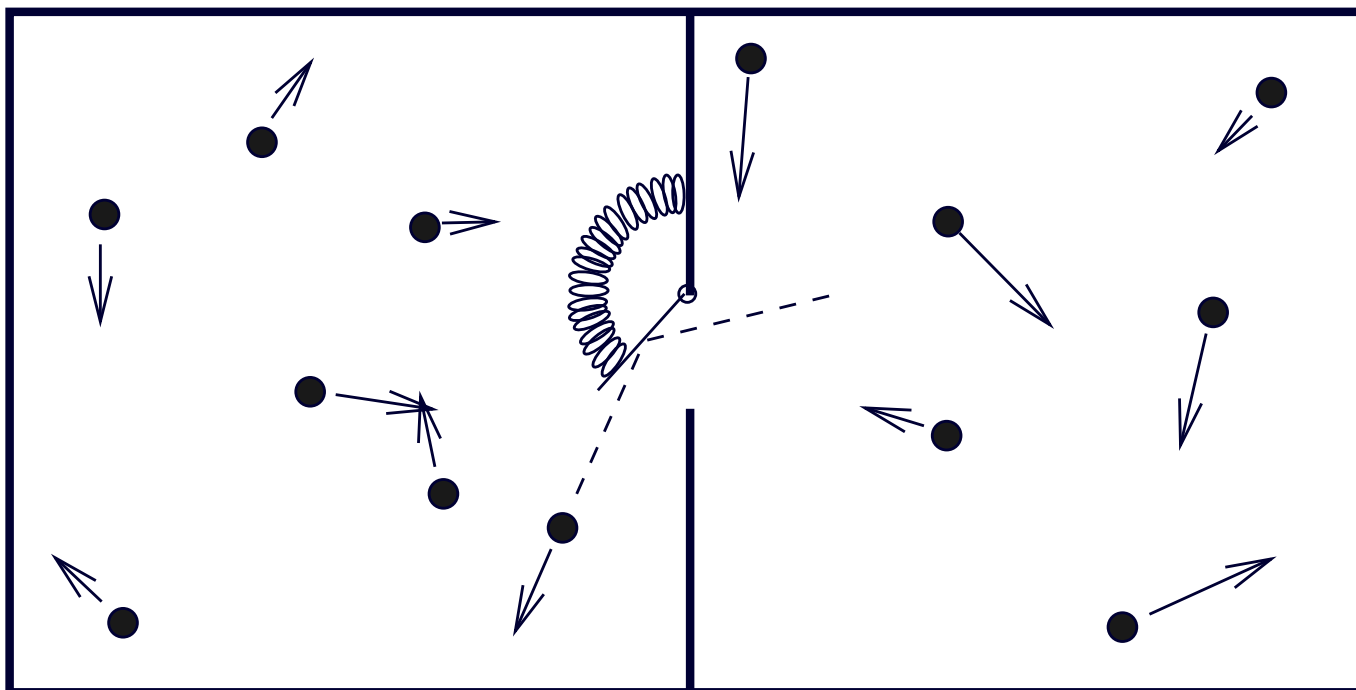


Maxwellův démon



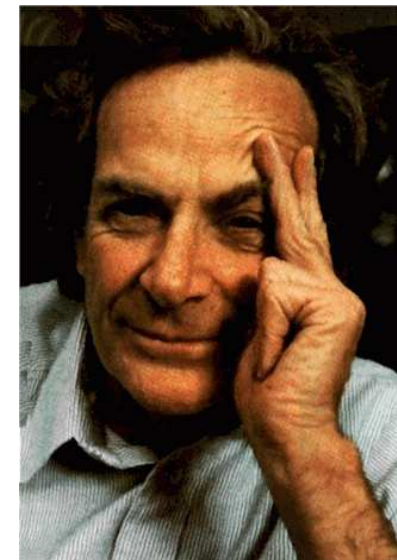
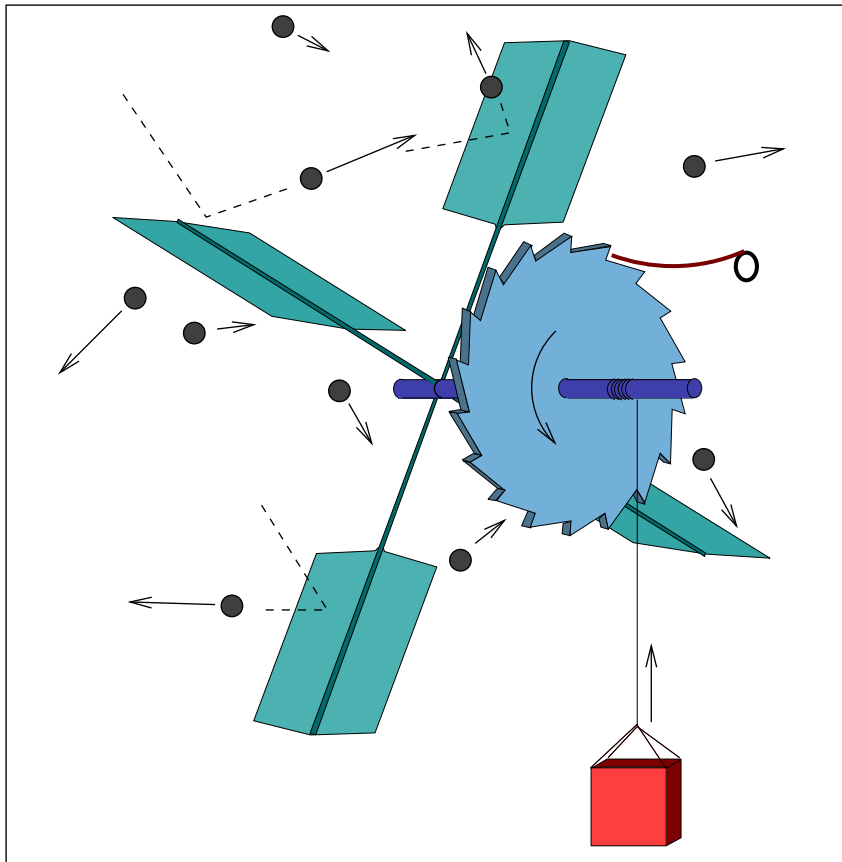
Maxwellův démon - možnosti automatického třídění molekul

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.

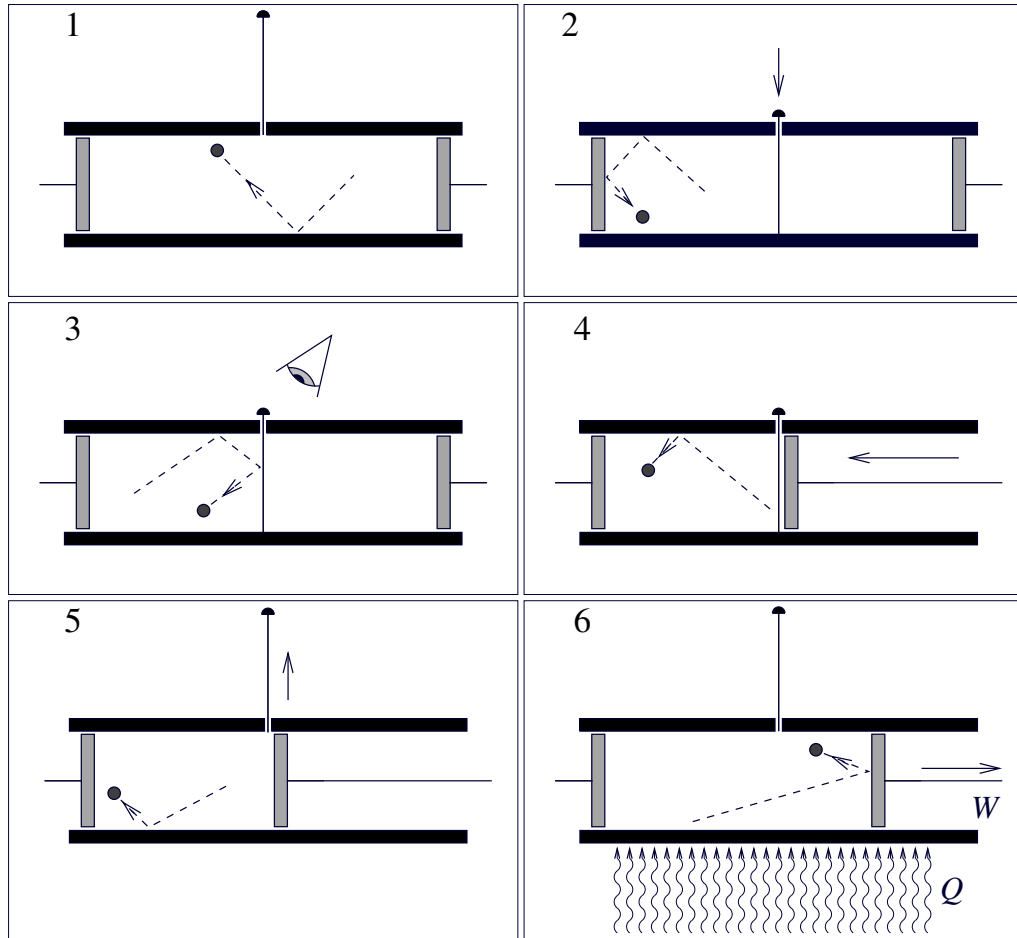
Von L. Szilard in Berlin.

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???

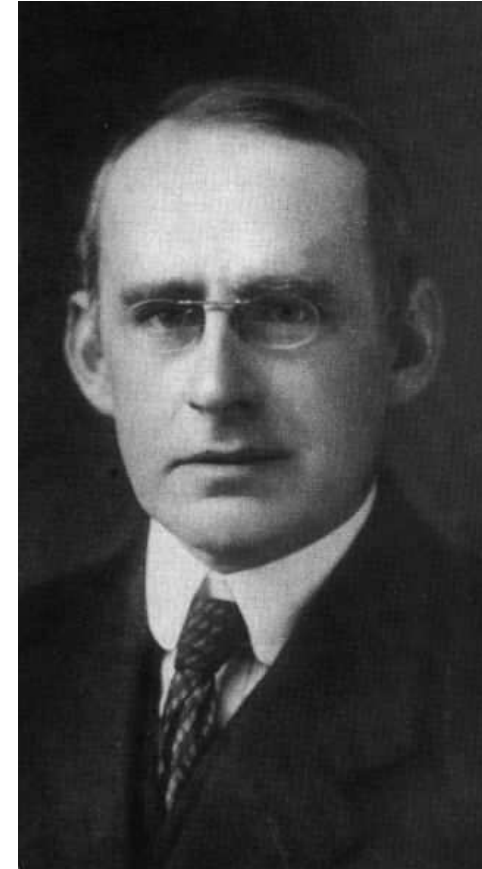
Možné odpovědi:

- 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).

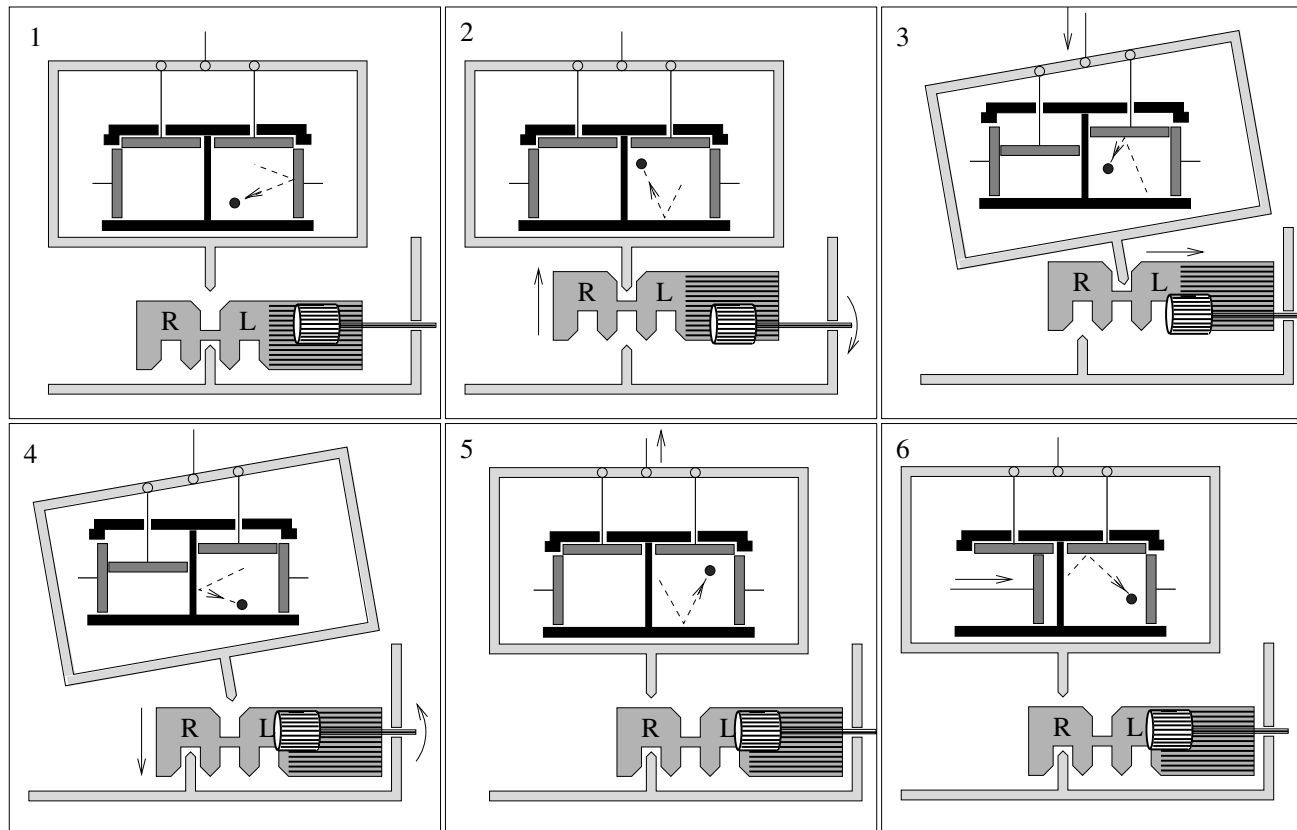


Maxwellův démon

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

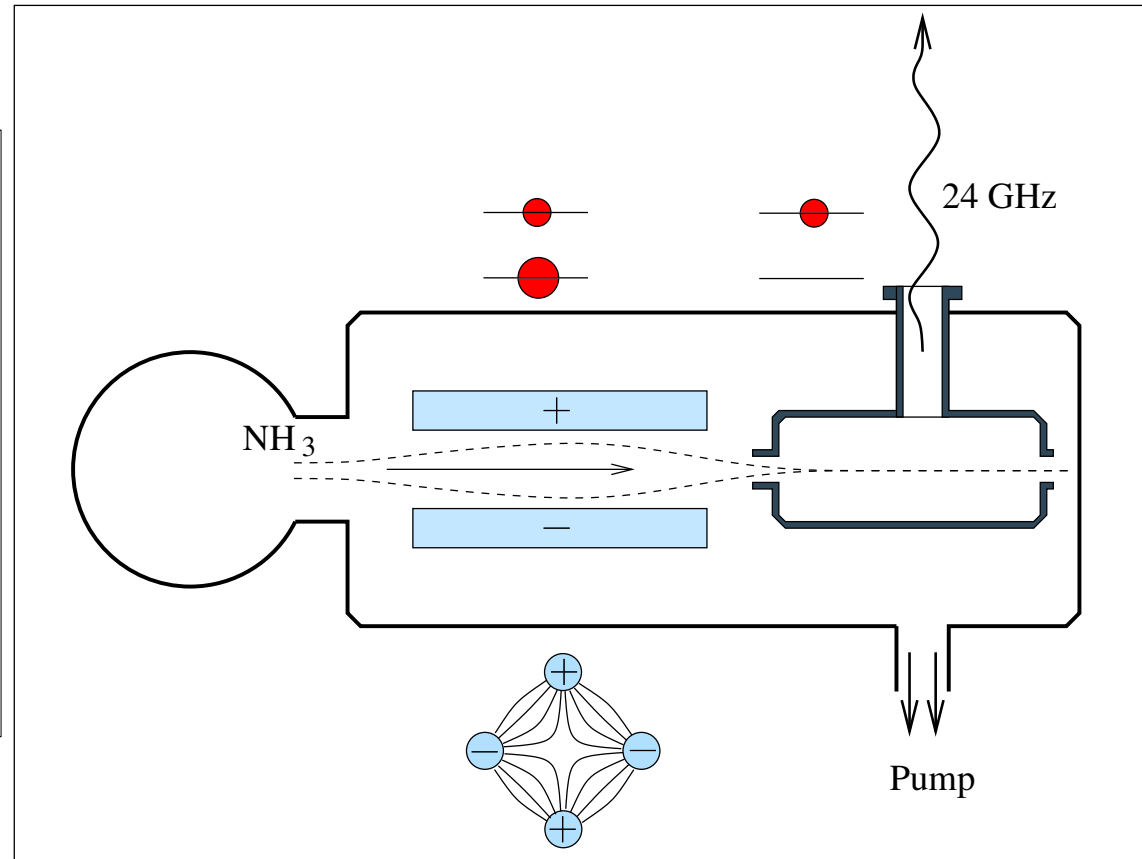
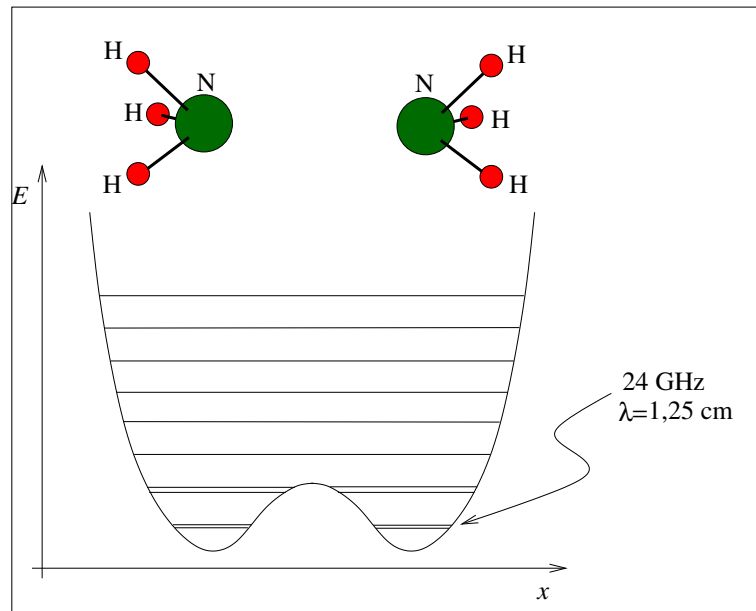
Problém je v nulování paměti!

- **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)

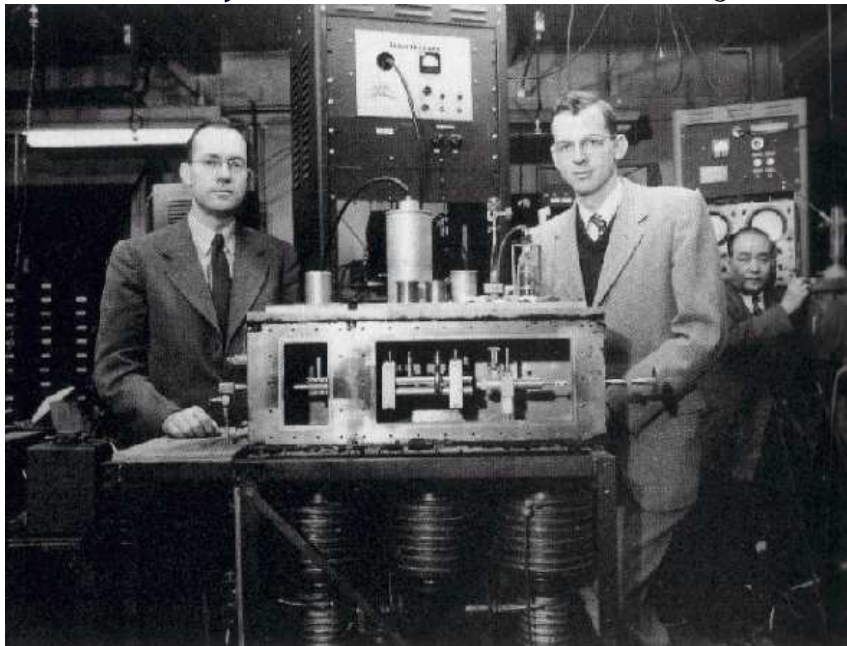
Amoniakový maser



AMONIAKOVÝ MASER

- 1951 Princip maseru - Townesův nápad ráno na lavičce v parku
- 1954 duben - první úspěšně fungující maser Gordon, Zeiger & Townes, podobné výsledky hlásí i Basov a Prochorov v SSSR.
- 1964 Nobelova cena (Townes, Basov, Prochorov)

Charles Townes, Jim Gordon & NH₃ maser, 1954



Maser a Maxwellův démon: Scullyho schéma

VOLUME 87, NUMBER 22

PHYSICAL REVIEW LETTERS

26 NOVEMBER 2001

Extracting Work from a Single Thermal Bath via Quantum Negentropy

Marlan O. Scully

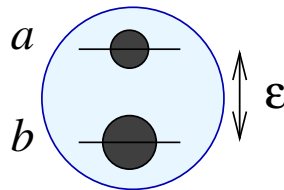
*Department of Physics and Institute for Quantum Studies, Texas A&M University, College Station, Texas 77843
and Max-Planck-Institut für Quantenoptik, D-85748 Garching, Germany*

(Received 5 March 2001; published 12 November 2001)

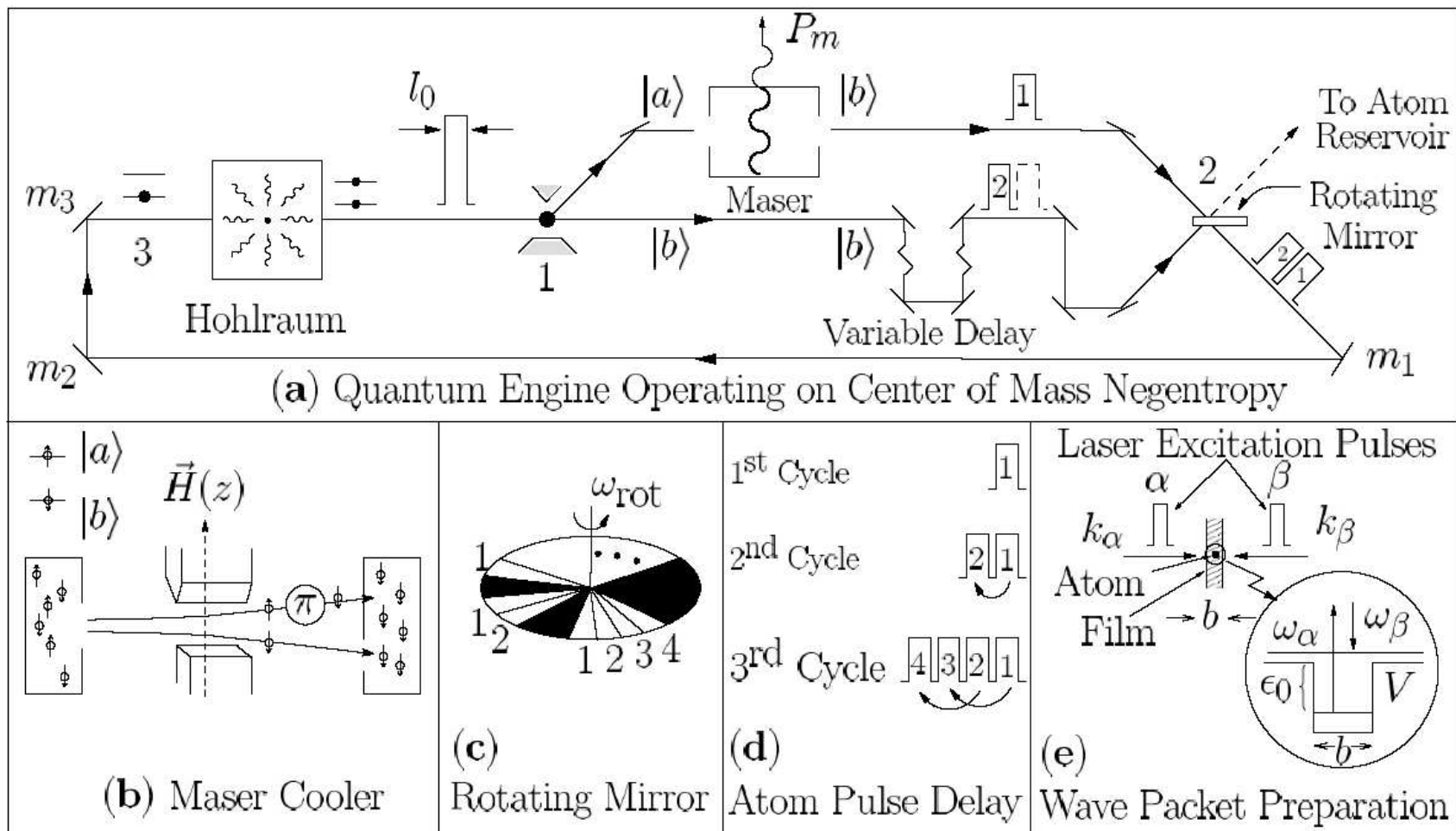
Classical heat engines produce work by operating between a high temperature energy source and a low temperature entropy sink. The present quantum heat engine has no cooler reservoir acting as a sink of entropy but has instead an internal reservoir of negentropy which allows extraction of work from one thermal bath. The process is attended by constantly increasing entropy and does not violate the second law of thermodynamics.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.220601

PACS numbers: 05.70.-a



Maser a Maxwellův démon: Scullyho schéma



Maser a Maxwellův démon: Scullyho schéma

Přeměna energie termálního záření (tepla) na energii koherentního maserového záření (práci), dokud lze odkládat entropii do pohybových stupňů volnosti atomu.

Ale:

- ohřívání atomu v dutině je ireverzibilní proces → snížení účinnosti
- jak „vynulovat“ polohu atomu bez nadbytečné disipace energie?

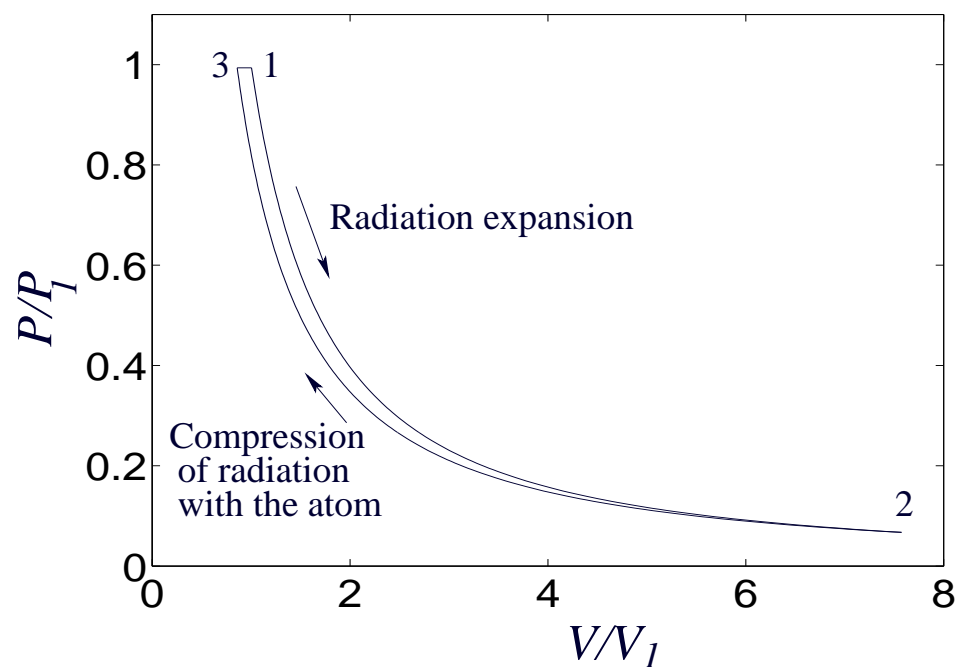
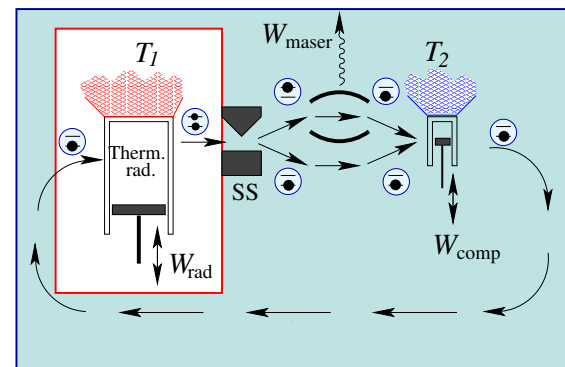
Maser jako vratný tepelný stroj

T. Opatrný, American Journal of Physics **73**, 63-68 (2005).

Maser jako vratný tepelný stroj

Vratné ohřívání atomu

1. Adiabatická expanze záření
2. Adiabatická komprese záření s atomem
3. Izotermická expanze záření na původní objem



Adiabatický proces s atomem a zářením: diferencováním $E = E^{(\text{rad})} + E^{(\text{at})}$ a s užitím $dE = TdS - pdV$ dostaneme

$$\frac{dV}{dT} = -\frac{3V}{T} - \frac{3}{4b} \frac{C^{(\text{at})}(T)}{T^4}, \quad (1)$$

$$V(T) = V_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^3 - \frac{3}{4bT^3} \int_{T_0}^T \frac{C^{(\text{at})}(T')}{T'} dT', \quad (2)$$

$$V(P) = V_0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^{3/4} - \Delta V(P), \quad (3)$$

kde

$$\Delta V(P) = \frac{3}{4bT_0^3} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{3/4} \int_{T_0}^{T_0(P/P_0)^{1/4}} \frac{C^{(\text{at})}(T)}{T} dT. \quad (4)$$

Získaná mechanická práce:

$$W_{\text{rad}} = \int_{P_0}^{P_1} \Delta V(P) dP = \frac{3P_0^{3/4}}{4bT_0^3} \int_{P_0}^{P_1} \frac{dP}{P^{3/4}} \int_{T_0}^{T_0(P/P_0)^{1/4}} \frac{C^{(\text{at})}(T) dT}{T}. \quad (5)$$

Změnou pořadí integrace

$$W_{\text{rad}} = \frac{3P_0^{3/4}}{4bT_0^3} \int_{T_0}^{T_1} \frac{C^{(\text{at})}(T) dT}{T} \int_{P_0(T/T_0)^4}^{P_1} \frac{dP}{P^{3/4}}, \quad (6)$$

$$= T_1 \int_{T_0}^{T_1} \frac{C^{(\text{at})}(T) dT}{T} - \int_{T_0}^{T_1} C^{(\text{at})}(T) dT = T_1 S^{(\text{at})}(T_1) - E^{(\text{at})}(T_1) \quad (7)$$

$$= kT_1 \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{\epsilon}{kT_1} \right) \right], \quad (8)$$

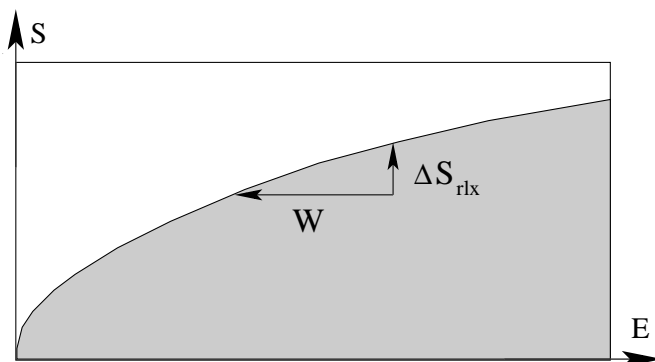
Zkratka: výpočet maximální práce dosažitelné z nerovnovážného systému přes rozdíl entropií.

$$\Delta S_{\text{rlx}} = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_V W, \quad T = \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right)_V, \quad (9)$$

a tedy

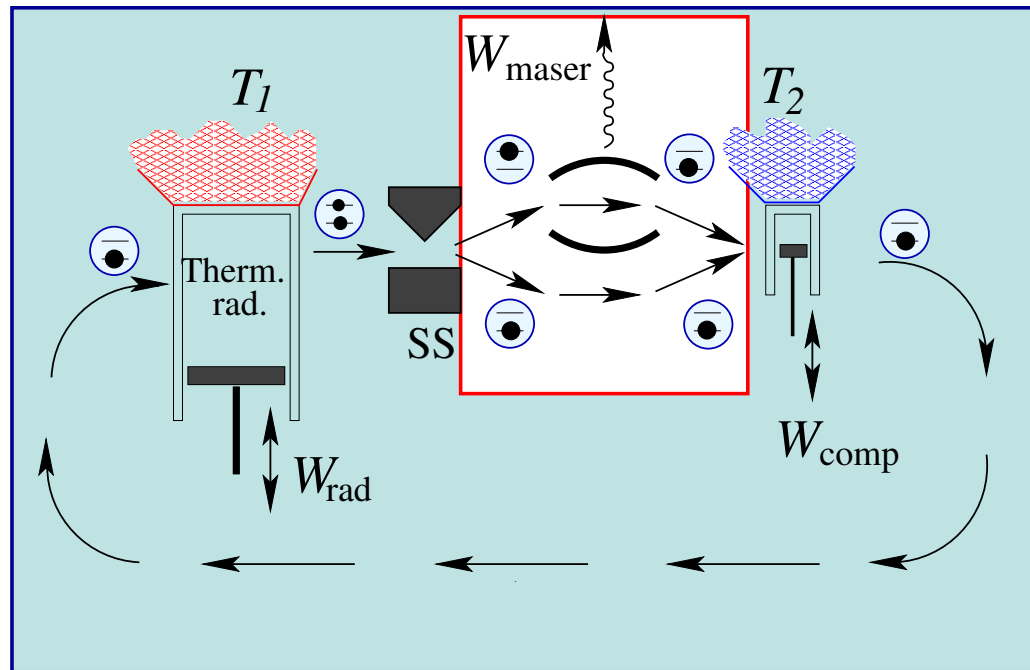
$$W = T \Delta S_{\text{rlx}}, \quad (10)$$

$$W_{\text{rad}} = T_1 \left[S^{(\text{at})}(T_1) - \frac{E^{(\text{at})}(T_1)}{T_1} \right] = T_1 S^{(\text{at})}(T_1) - E^{(\text{at})}(T_1). \quad (11)$$



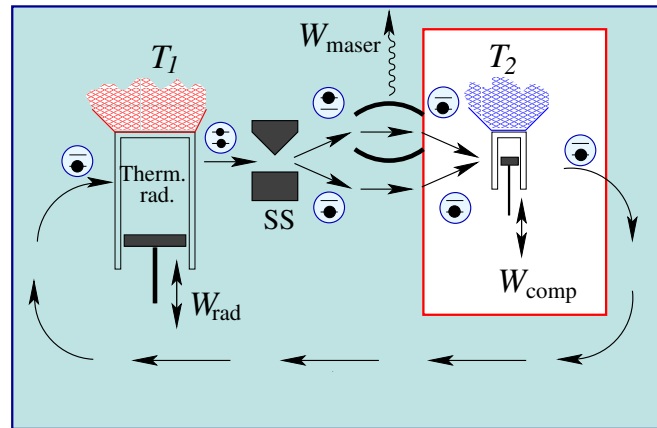
Maser jako vratný tepelný stroj

Práce maseru



$$W_{\text{maser}} = p_a \epsilon = E^{(\text{at})}(T_1).$$

Maser jako vratný tepelný stroj Reverzibilní stlačování objemu



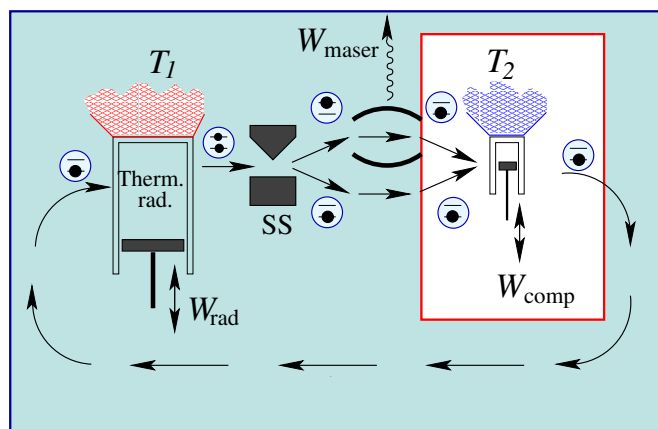
Atom byl původně lokalizován v objemu V_0 , nyní je někde v celkovém objemu $2V_0$.

Nutno stlačit na V_0 (při teplotě T_2).

Stlačujeme v jedné dráze na V_a a ve druhé na V_b :

$$V_a + V_b = V_0, \quad V_a/V_b = p_a/p_b$$

Reverzibilní stlačování objemu



Podle původního stavu atomu konáme práci buď

$$W_a = kT_2 \ln \frac{V_0}{V_a} = -kT_2 \ln p_a,$$

nebo

$$W_b = kT_2 \ln \frac{V_0}{V_b} = -kT_2 \ln p_b.$$

Průměrná práce

$$W_{\text{comp}} = p_a W_a + p_b W_b = -kT_2 (p_a \ln p_a + p_b \ln p_b) = T_2 S^{(\text{at})}(T_1)$$

je pro konečné teploty nižší než $kT_2 \ln 2$.

Energetická bilance a účinnost stroje

Výsledná čistá práce:

$$\begin{aligned}W_{\text{net}} &= W_{\text{rad}} + W_{\text{maser}} - W_{\text{comp}} \\&= \left[T_1 S^{(\text{at})}(T_1) - E^{(\text{at})}(T_1) \right] + E^{(\text{at})}(T_1) - T_2 S^{(\text{at})}(T_1) \\&= (T_1 - T_2) S^{(\text{at})}(T_1).\end{aligned}$$

Vstupní teplo:

$$Q_{\text{in}} = W_{\text{rad}} + W_{\text{maser}} = T_1 S^{(\text{at})}(T_1).$$

Účinnost:

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} = 1 - \frac{W_{\text{comp}}}{W_{\text{rad}} + W_{\text{maser}}} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

Přeměna mechanické práce na maserové záření:

při $T_1 = T_2$ je $W_{\text{net}} = 0$ a tedy

$$W_{\text{rad}} = W_{\text{comp}} - W_{\text{maser}}.$$

Přeměna tepla na maserové záření:

Při teplotě vnějších stupňů volnosti atomu

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{x}{(e^x + 1) \ln(1 + e^{-x})} \right]^{-1}, \quad x = \epsilon/kT_1$$

je

$$W_{\text{mech}} = W_{\text{rad}} - W_{\text{comp}} = 0$$

$$W_{\text{maser}} = Q_{\text{in}}$$

Srovnání se Scullyho cyklem:

Bez vratného ohřívání atomů a optimálního stlačování objemu:

$$W_{\text{mech}} = -W_{\text{comp}} = -kT_2 \ln 2,$$

$$Q_{\text{in}} = E^{(\text{at})}(T_1),$$

$$W_{\text{maser}} = E^{(\text{at})}(T_1),$$

$$W_{\text{net}} = E^{(\text{at})}(T_1) - kT_2 \ln 2,$$

tedy čistou práci lze produkovat pouze při dostatečném rozpětí teplot. Např. s $T_1 = T_2$ se přeměňuje mechanická práce na maserovou s účinností

$$\frac{W_{\text{maser}}}{|W_{\text{mech}}|} = \frac{E^{(\text{at})}(T_1)}{kT_1 \ln 2};$$

pokud $\epsilon/kT_1 = x_0 = 1.278$, účinnost je ≈ 0.40 (srv. $W_{\text{maser}}/|W_{\text{mech}}| = 1$ ve vratném případě).

MAXWELL'S DEMON AND THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS

Richard L. Liboff

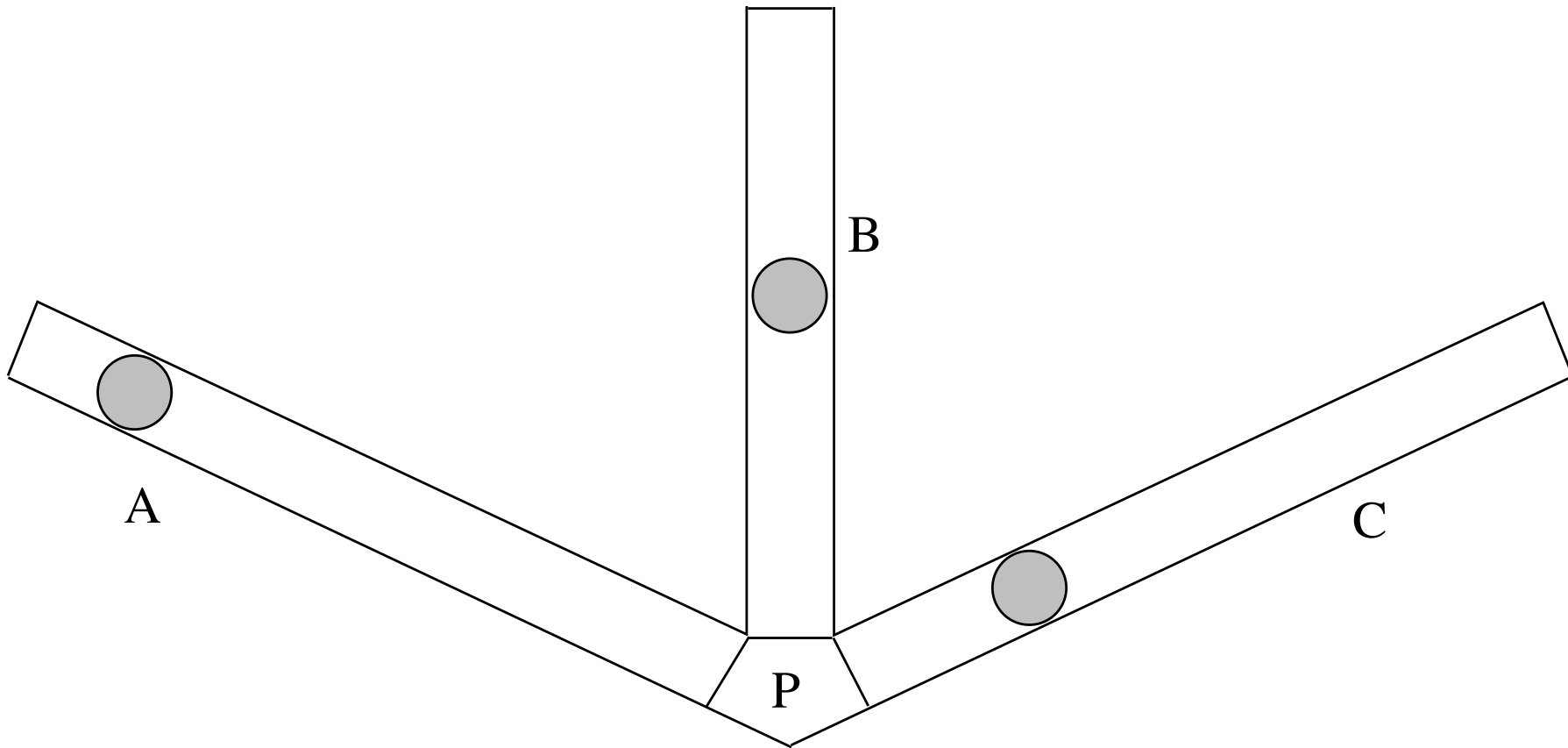
*Schools of Electrical Engineering and Applied Physics
Cornell University
Ithaca, New York 14853*

Received August 1, 1996

An idealized, two-dimensional Maxwell demon is described which incorporates an irreversible process. The vertex of the device acts as a purely mechanical 'trap door'. This idealized mechanism is found to generate a violation of the second law of thermodynamics. These results indicate that the second law of thermodynamics is not valid in general for idealized, irreversible systems.

Key words: irreversibility, second law, Maxwell demon, entropy.

**Maxwellův démon:
R. L. Liboff, Found. Phys. Lett. 10, 89 (1997)**




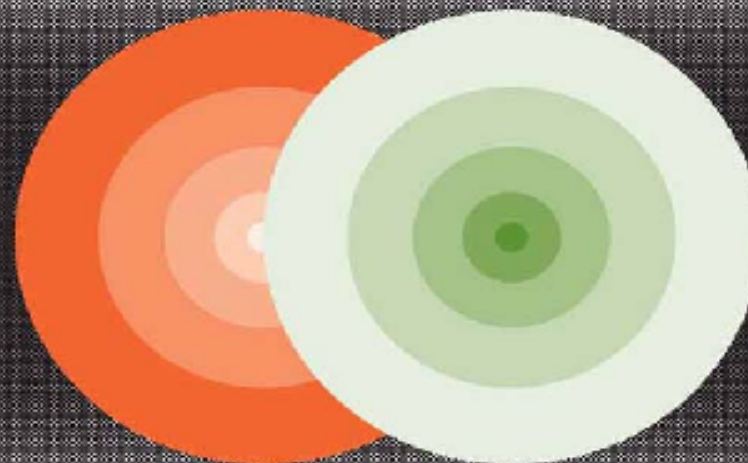
Všechny disky se soustředí v kanále B.

Challenges to the Second Law of Thermodynamics

Theory and Experiment

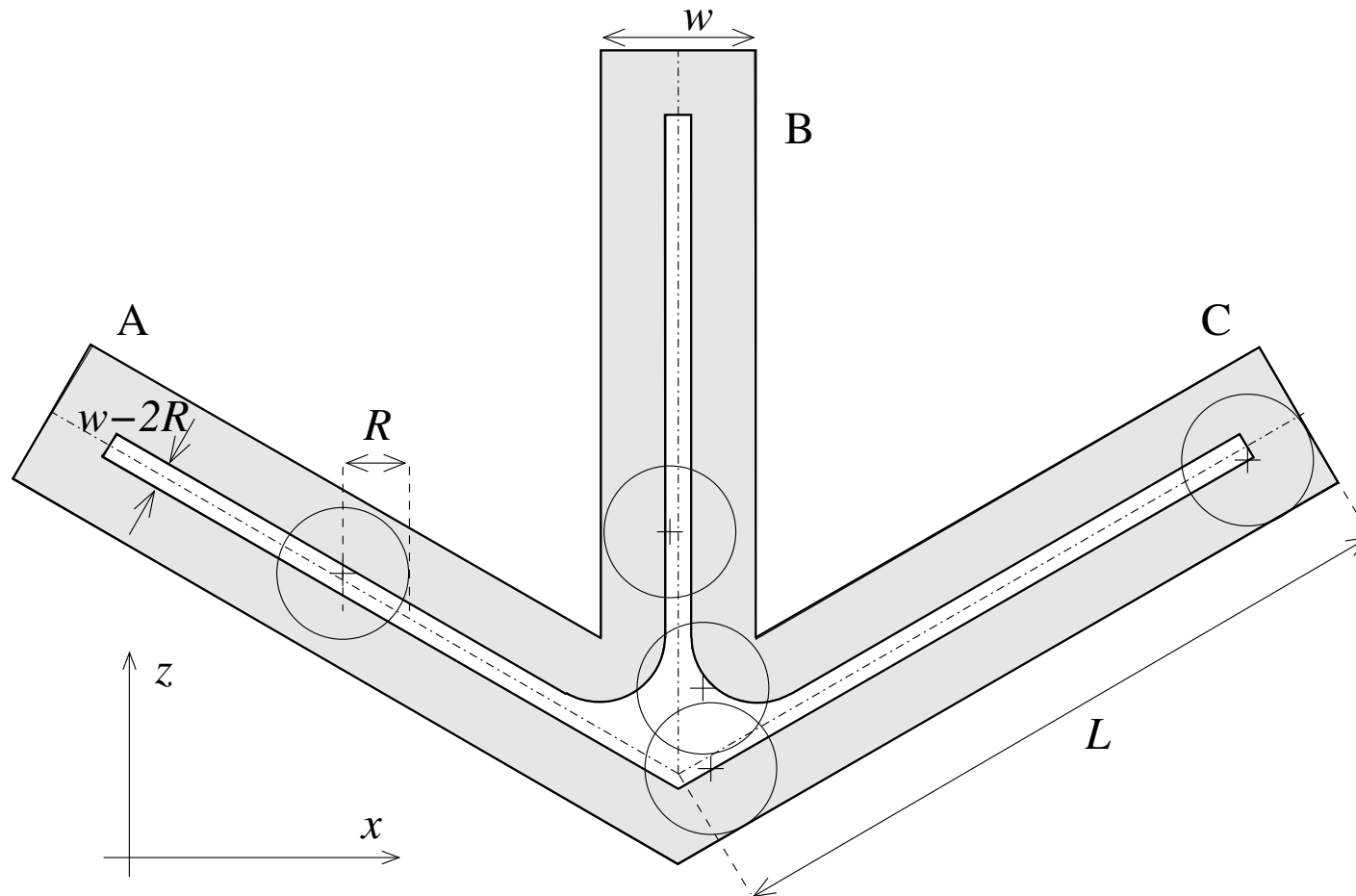
by
**Vladislav Čápek and
Daniel P. Sheehan**

 Springer

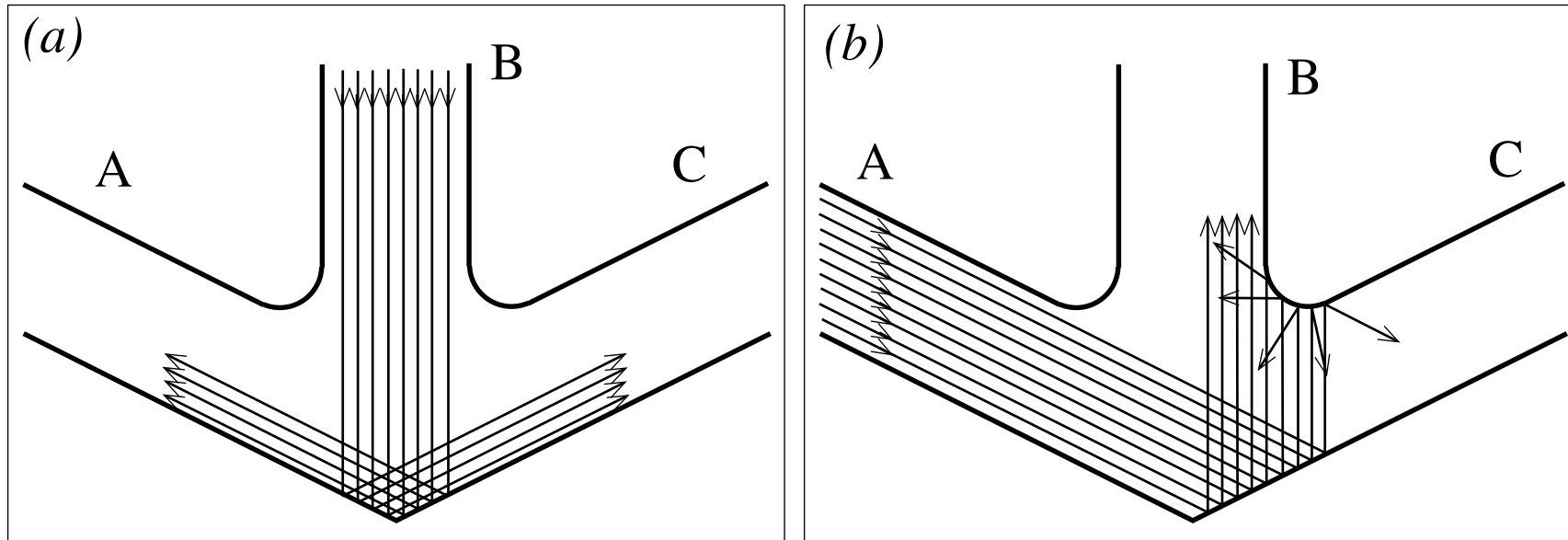


Fundamental Theories of Physics

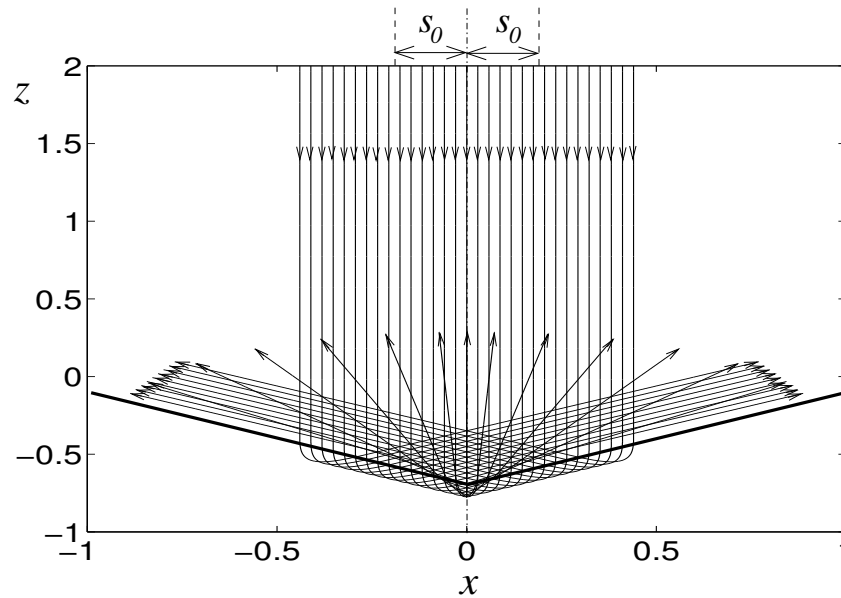
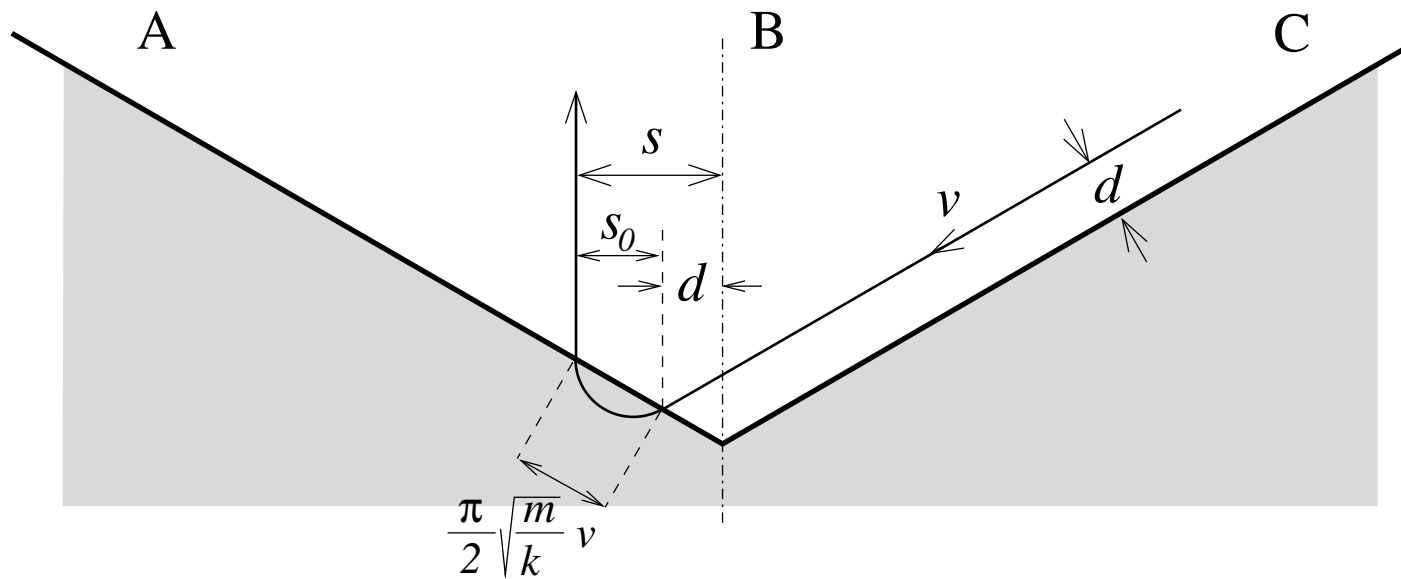
Zuzana Mišáková, T.Opatrný: Exorcising Maxwell's Demon from Liboff's Three-Channel Conundrum



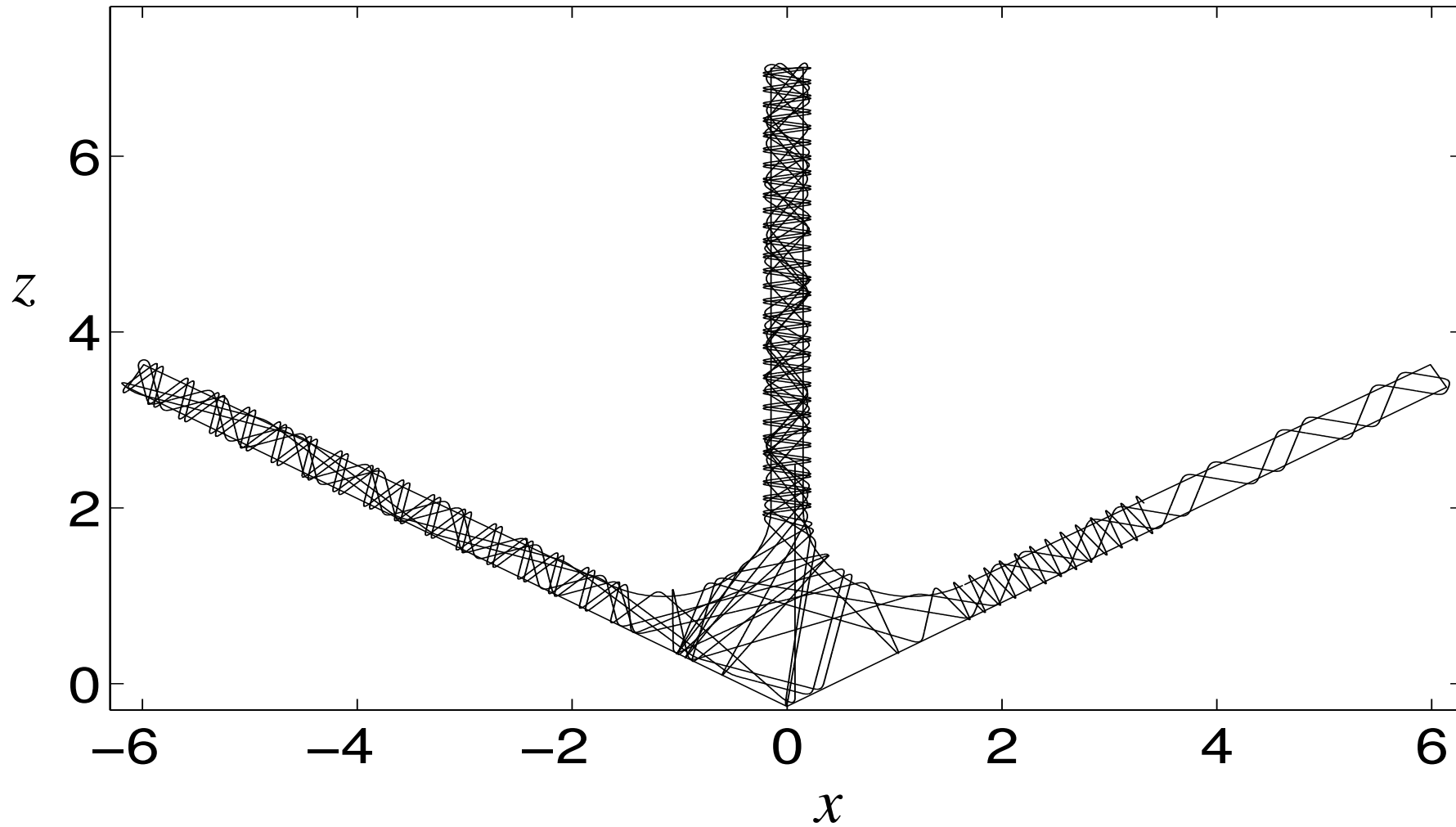
Vymítání třicestného Maxwellova démona



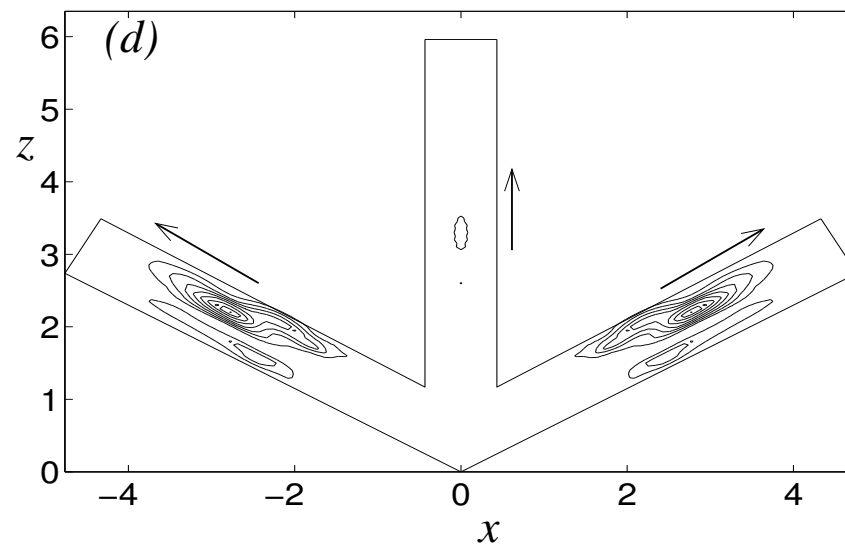
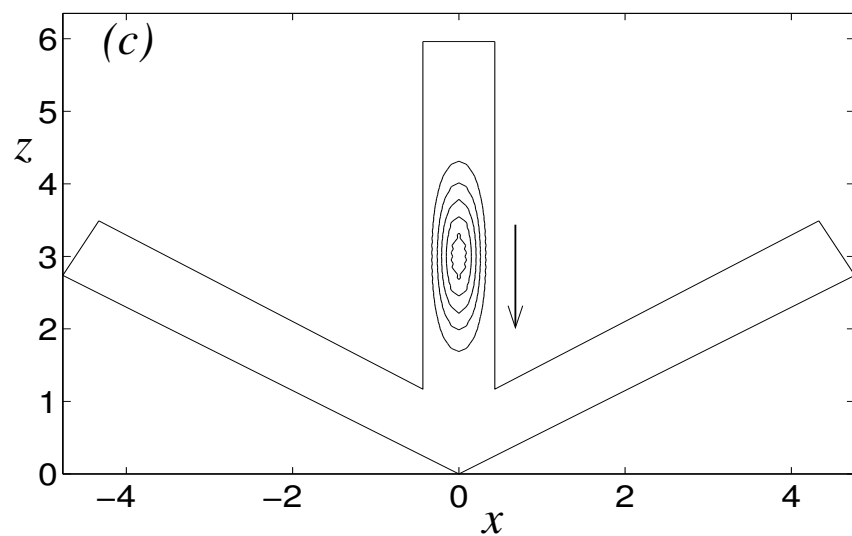
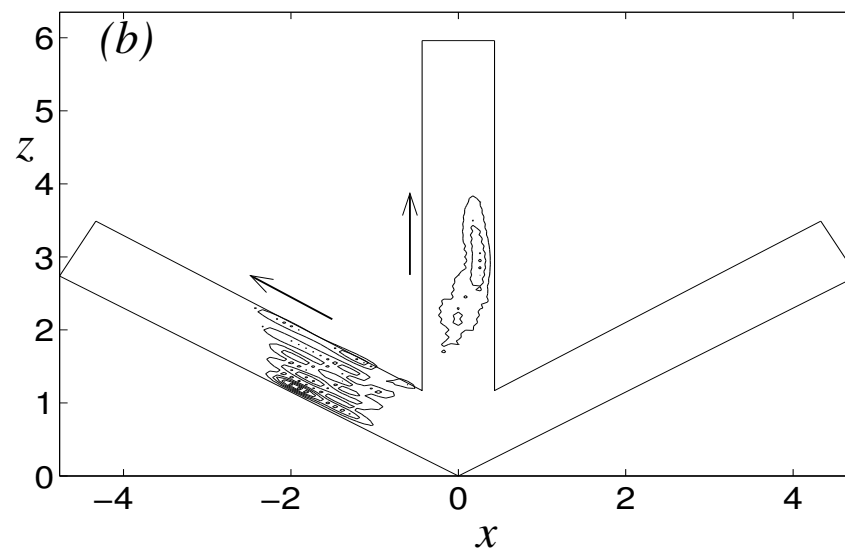
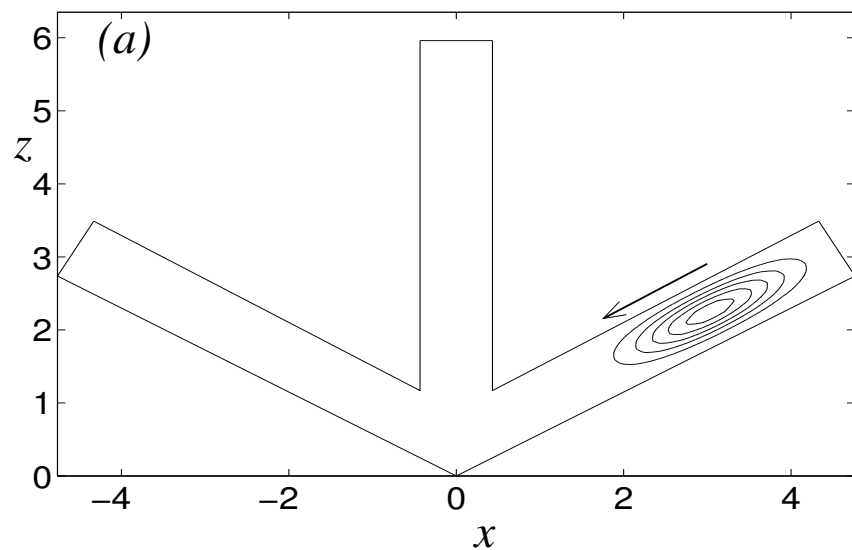
Vymítání třicestného Maxwellova démona



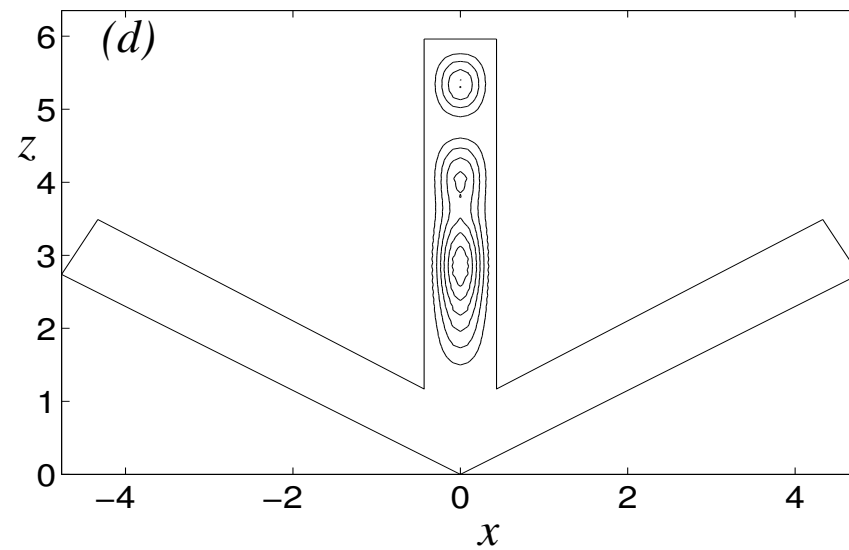
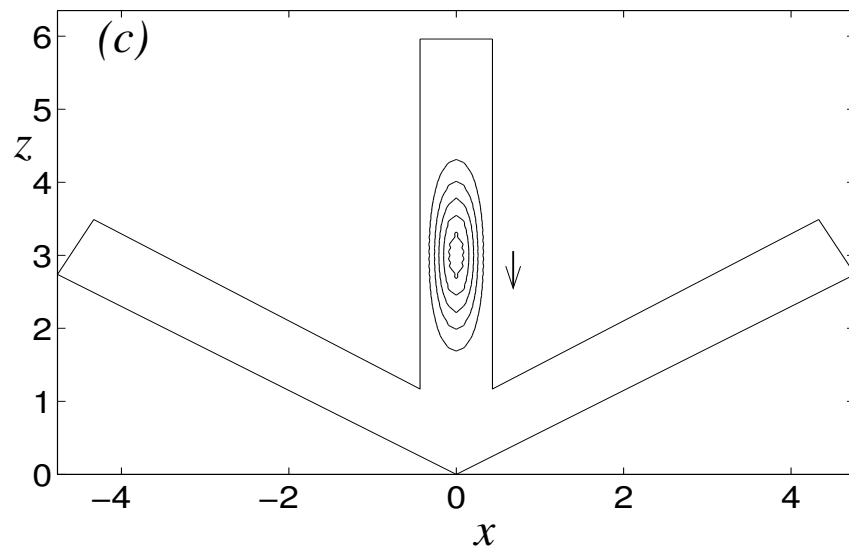
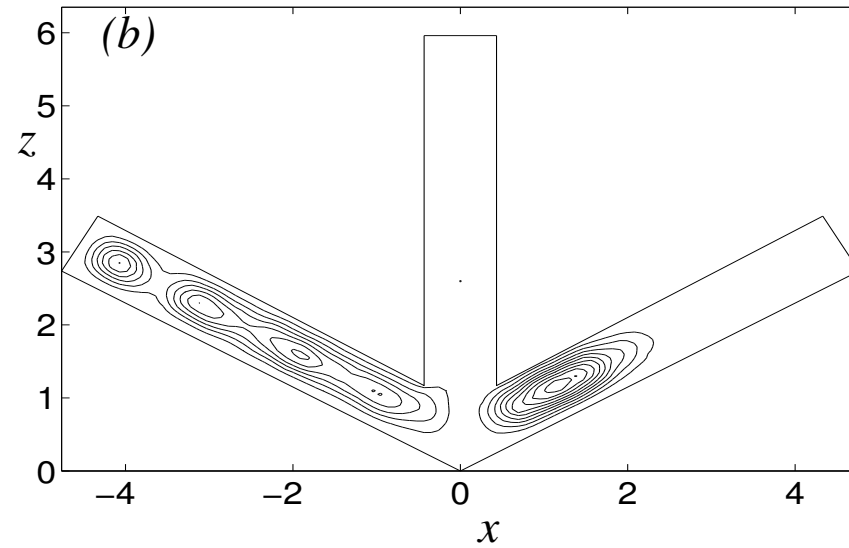
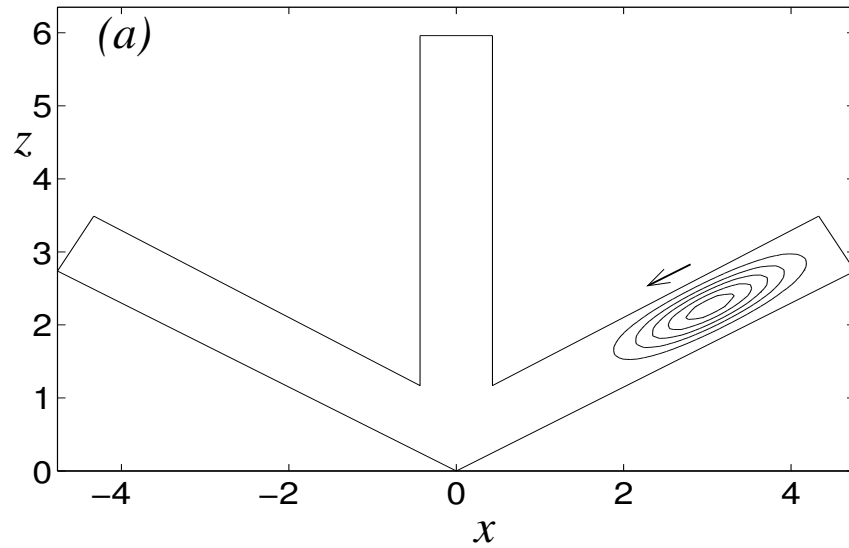
Vymítání třicestného Maxwellova démona



Kvantový model: rychlá částice



Kvantový model: pomalá částice



Černé díry a termodynamika

Bekenstein 1973: Černá díra má entropii úměrnou povrchu,

$$S_{BH} = 4\pi k \left(\frac{M}{m_P} \right)^2,$$

$$E = Mc^2,$$

$$m_P = \sqrt{\hbar c / G} \approx 2.2 \times 10^{-8} \text{kg}.$$

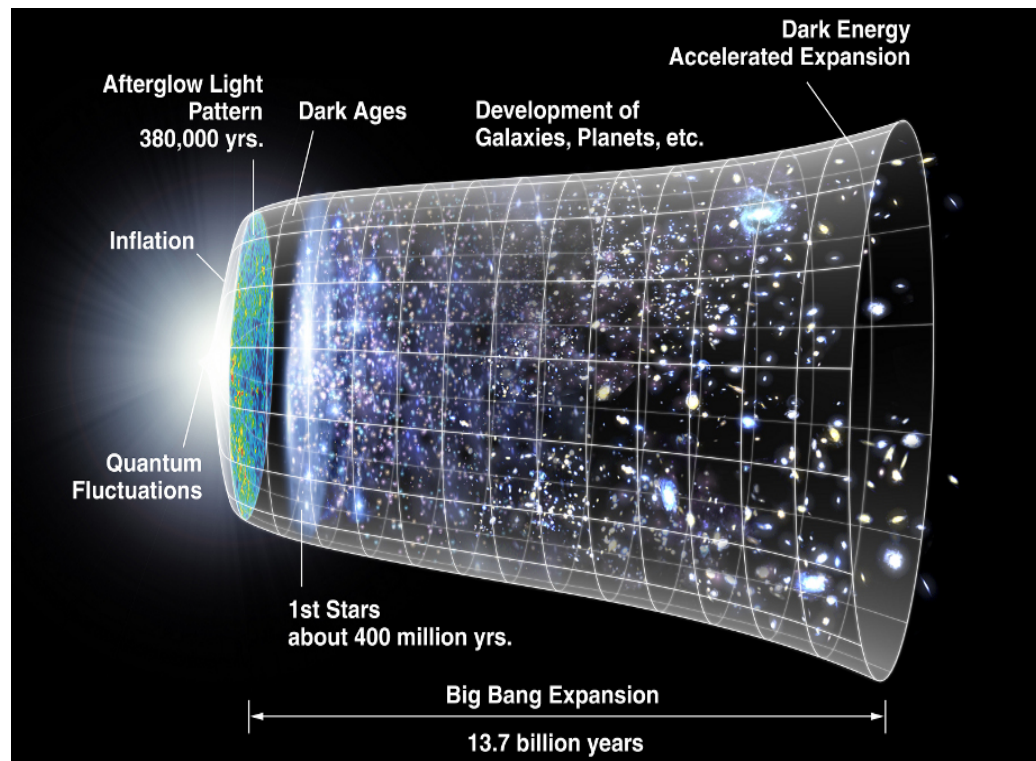
Musí tedy mít i teplotu:

$$T_{BH} = \frac{\partial E_{BH}}{\partial S_{BH}} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M}.$$

Pokud má teplotu, můžeme ji použít k pohonu tepelných strojů?

Role černých děr v pozdním stadiu vesmíru

- S. Frautschi *Entropy in an expanding universe*, Science **217**, 593 (1982).
- L. M. Krauss and G. D. Starkman *Life, the universe, and nothing : life and death in an ever-expanding universe*, The Astrophysical Journal **531**, 22 (2000).



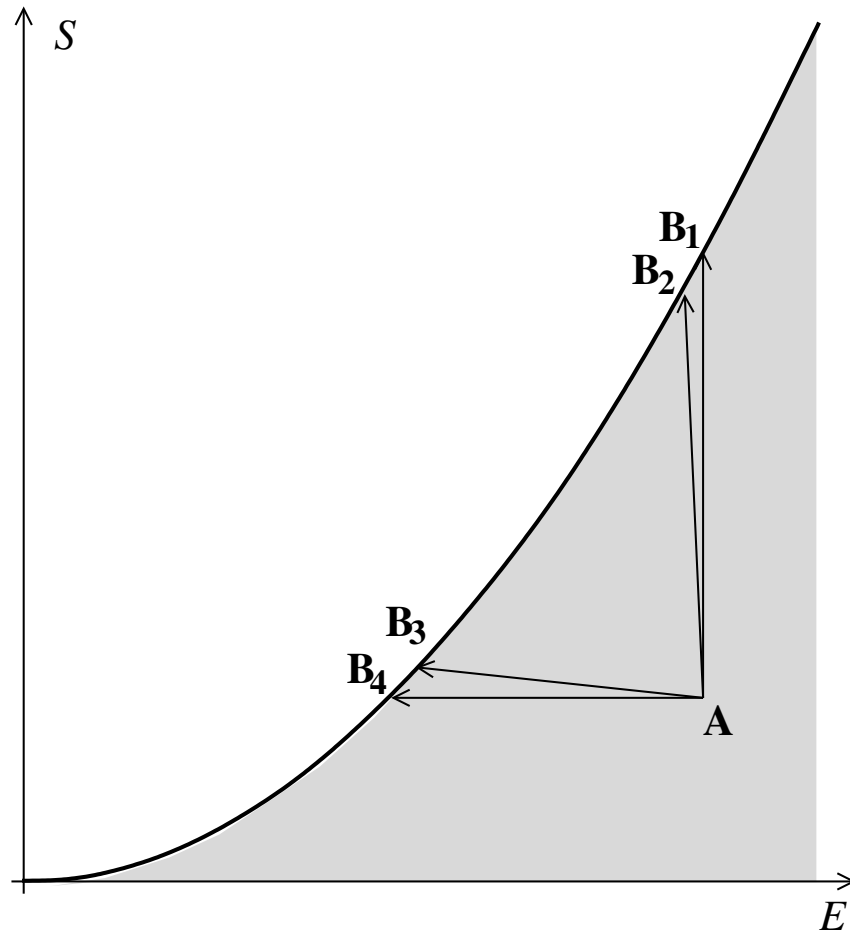
Černé díry a termodynamika

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?

Černé díry a termodynamika



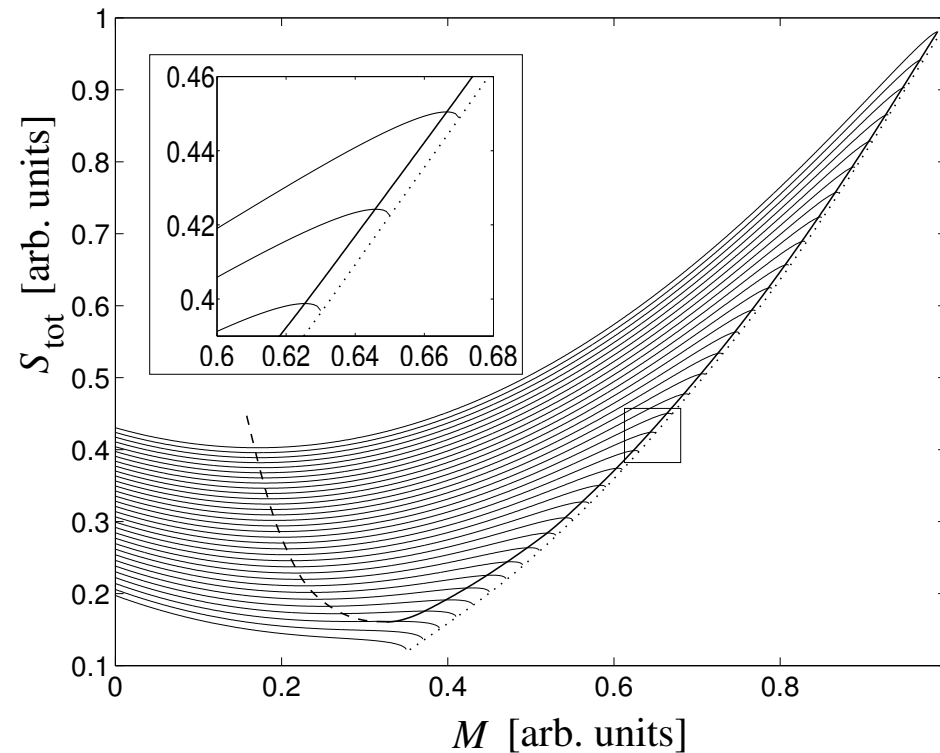
Energie a entropie

Černé díry a termodynamika

Černá díra a záření v objemu V

$$E_{\text{tot}} = Mc^2 + aVT^4,$$

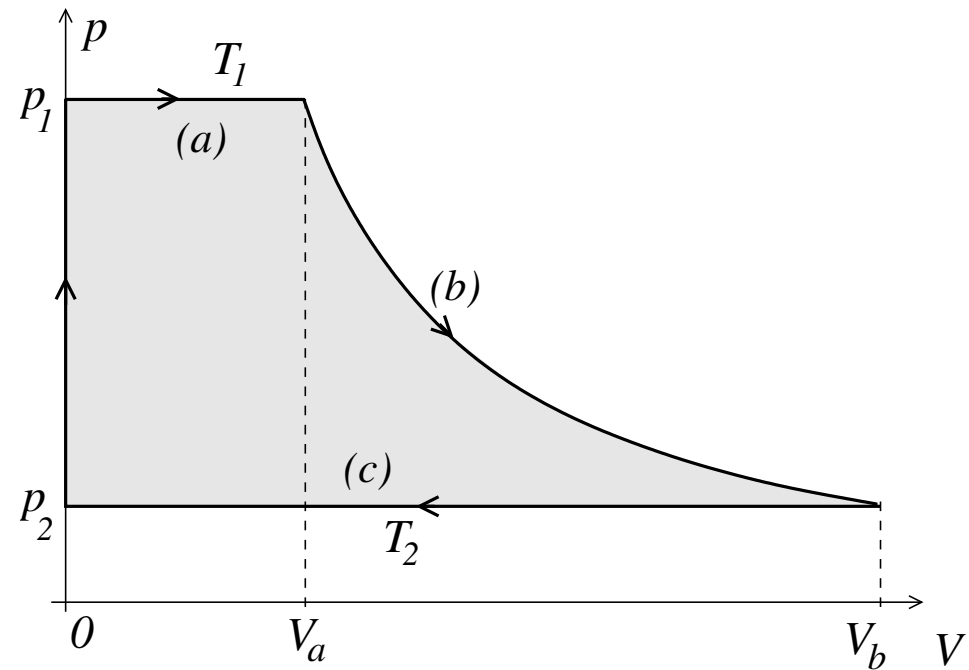
$$S_{\text{tot}} = k \left[\frac{4\pi G}{\hbar c} M^2 + \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{\pi^2 V c^3}{15\hbar^3}} (M_{\text{tot}} - M)^{3/4} \right],$$



Tepelný stroj s černými dírami

Carnotův proces [T.O. & L. Richterek, Am. J. Phys., přijato k publikaci]

Tepelný stroj s černými dírami



Carnotův proces

$$\eta \equiv \frac{W}{Q_a} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$W_{\text{tot}} = \left(M_{1,0} + M_{2,0} - \sqrt{M_{1,0}^2 + M_{2,0}^2} \right) c^2.$$

Tepelný stroj s černými dírami

Výkon

$$P \ll \frac{\pi k^2 T_2 (T_1 - T_2)}{240 \hbar}.$$

Příklad:

- $M_1 = 7.8 \times 10^{15} \text{ kg}$, $T_1 = 1,6 \times 10^7 \text{ K}$,
- $M_2 = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$, $T_2 = 60 \text{ nK}$
- $W \sim 7 \times 10^{32} \text{ J}$
- $P \ll 10^{-14} \text{ W}$

Shrnutí

1. Maxwellův démon a některé jeho modely, jednosměrná vrátka, západka s pružinou. . .
2. Szillardův stroj: jednomolekulový systém, lze najít i model s nedisipativním měřením polohy částice.
3. Landauerův princip: mazání paměti vyžaduje disipaci energie $kT \ln 2$ na každý bit.
4. Maser jako reverzibilní tepelný stroj: třídění molekul, entropie roste s objemem. Lze navrhnout reverzibilní model pracující s Carnotovou účinností.
5. Liboffův třícestný model (disky se setkají v prostředním kanále): model ale nemůže fungovat ani v idealizovaném případě, částici jsou dostupné i příčné stupně volnosti, nebo - v kvantovém případě - neplatí zákon odrazu.
6. Černé díry místo černého uhlí na topení v tepelných strojích? Může fungovat, ale velmi pomalu. . .

Děkuji za pozornost

