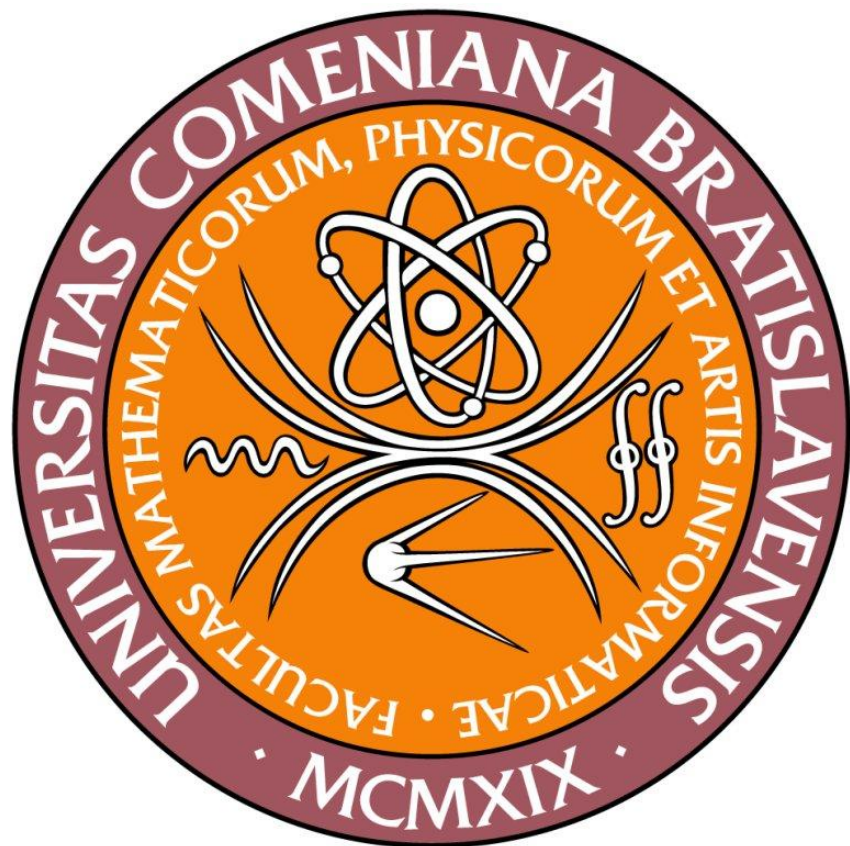
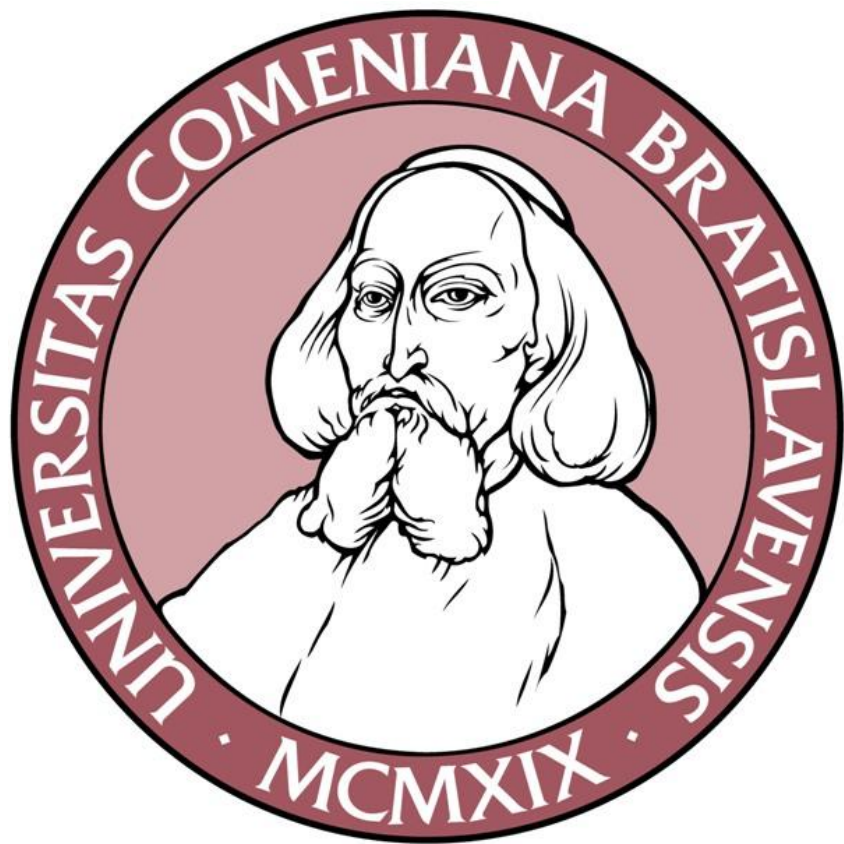


# Čo má spoločné hudba, šach a fyzika plynov?

---

**Juro Tekel**, KTF FMFI UK  
19. 4. 2021, Diera do sveta,  
virtuálny Liptovský Mikuláš



**Prečo niektoré  
veci dejú, ale  
niektoré nie?**

Horúca šálka kávy sa od vzduchu v miestnosti ochladí.

**Nikdy nie naopak!** Napriek tomu, že aj opačný proces by spĺňal zákony zachovania.

**Prečo sa plyn v  
miestnosti  
nenahrnie do  
jednej polovice?**

Bez ohľadu na to, ako plyn v nádobe  
nainicializujete, veľmi rýchlo ju  
rovnomerne vyplní.

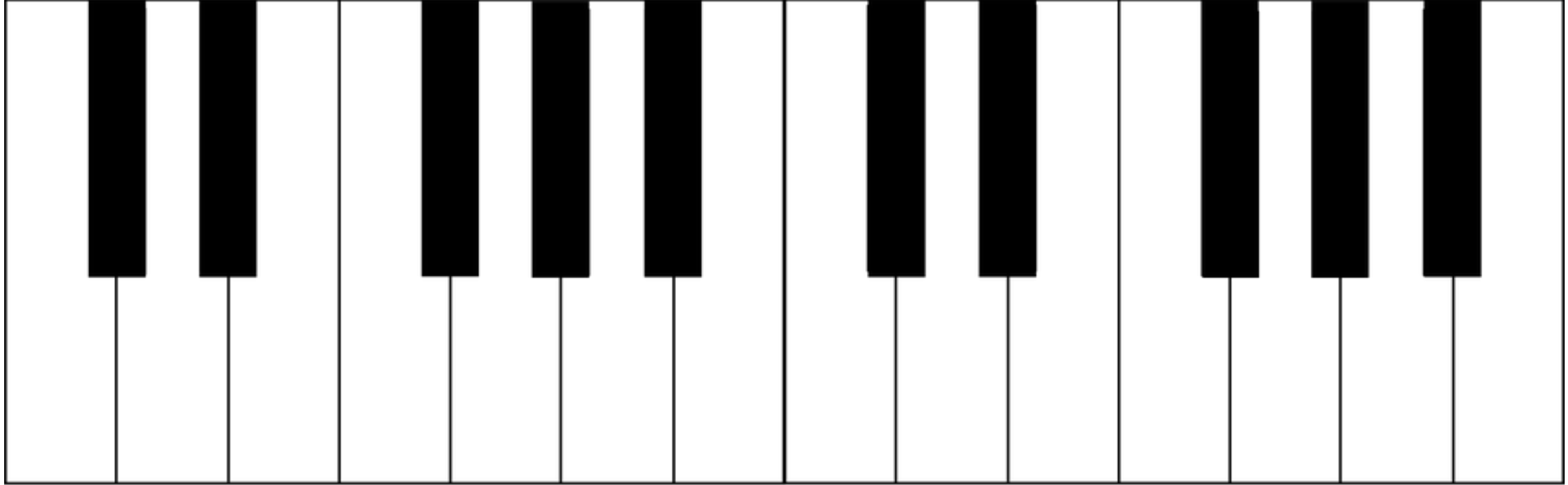
A zostane tak. Bez akejkoľvek ochoty  
svoj stav zmeniť.

Prečo?

**Preto, prečo existuje  
veľa pesničiek a prečo  
neporazíte veľmajstra  
náhodnými ťahmi.**

**Hudba**





Prvý tón - 24 možnosti.

Prvý tón - 24 možností.

Druhý tón - ďalších 24 možností,  
celkovo  $24 \times 24 = 576$  možností.

Prvý tón - 24 možností.

Druhý tón - ďalších 24 možností,  
celkovo  $24 \times 24 = 576$  možností.

Tretí tón - ďalších 24 možností,  
celkovo 13 824 možností.

Desať tónov - 63 403 380 965 376  
možností.

24 tónov -  $10^{33}$  možností.

Geometrická postupnosť,  
exponenciálny rast.

**Veľa pesničiek existuje  
preto, že existuje veľa  
rôznych postupností  
tónov.**

**Šach**

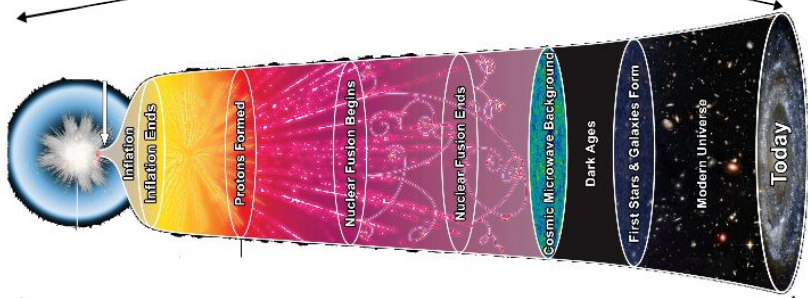
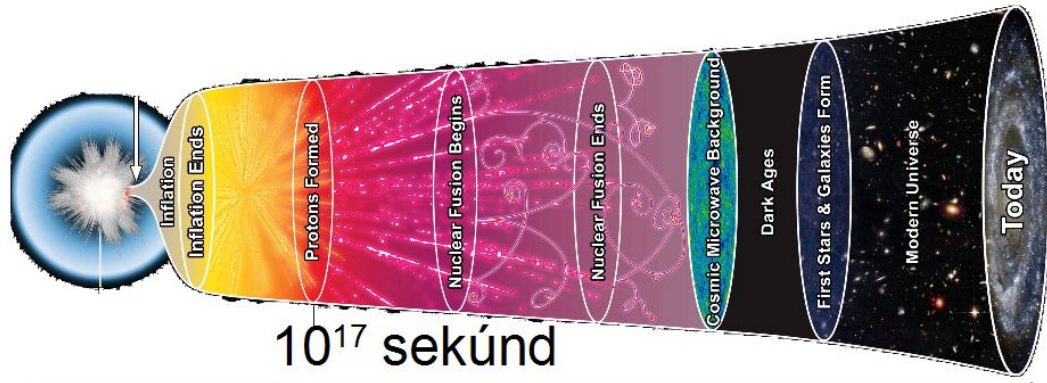




Na začiatok 20 ťahov bieleho.  
Potom 20 odpovedí čierneho.

Počet rôznych platných rozložení  
figúrok na šachovnici je niekde okolo  
 $10^{40}$ .





milión rôznych



**Šach ako hra má vôbec  
zmysel, lebo v ňom  
existuje veľa kombinácií.**



Väčšina z možných ťahov je **hlúpost**.

Rozumných odpovedí je v danej situácii veľmi málo.

Väčšina z možných ťahov je **hlúpost**.

Rozumných odpovedí je v danej situácii veľmi málo.

Niečo podobné už aj pri pesničkách.

**Väčšina ťahov je zlých.**

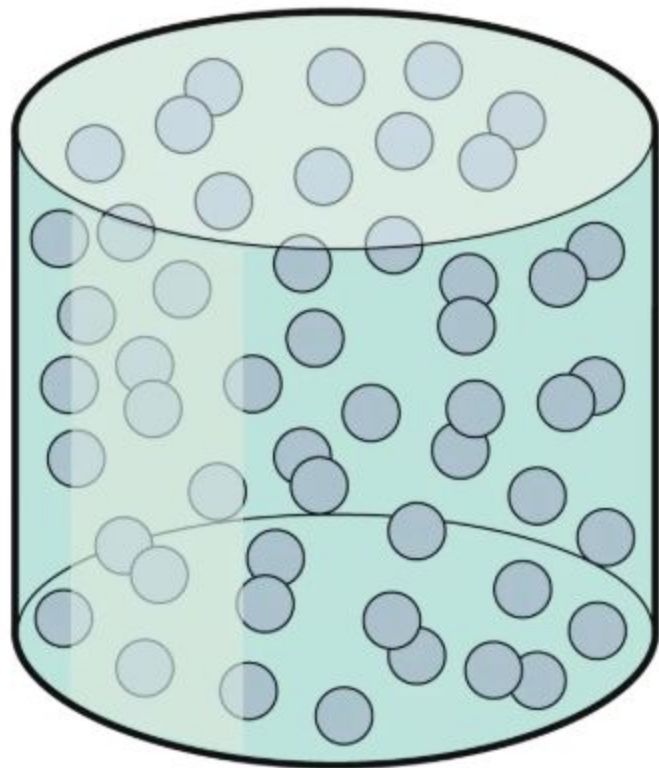
**Náhodné ťahy nevedú  
nikam.**

**Preto je šach ťažký.**



**Komplexnosť (veľa  
možností) vznikla z  
kombinovania malého  
počtu kúskov.**

**Eyzika**



Veci sa skladajú z **atómov**.

Veci sa skladajú z **atómov**.

Atómy sú malé.

Veci sa skladajú z **atómov**.

Atómy sú malé. **Fakt malé**.

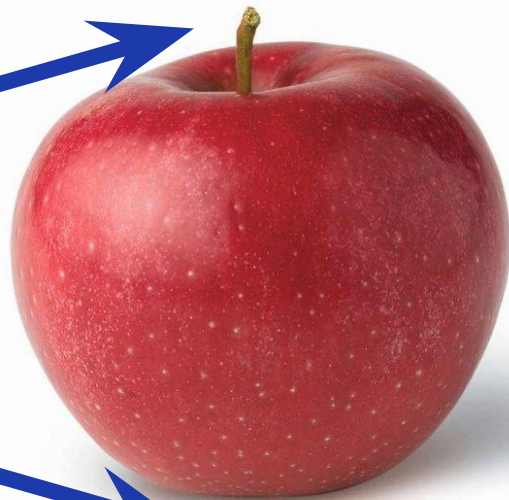
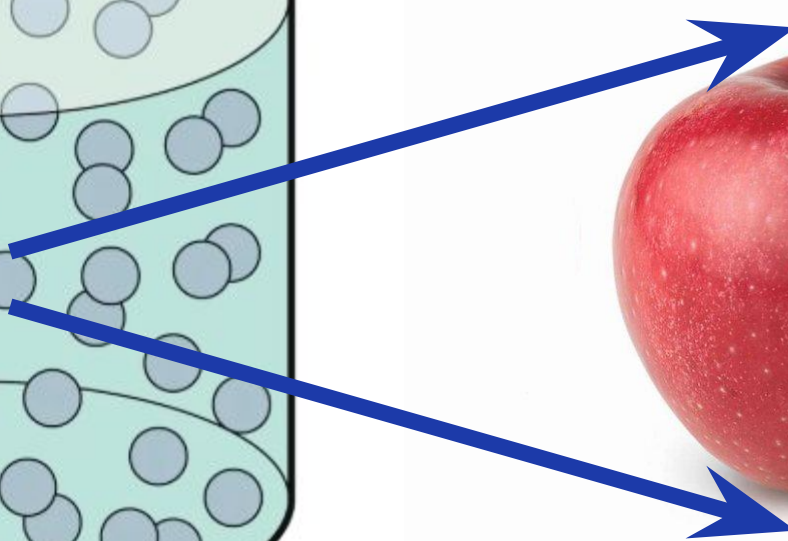
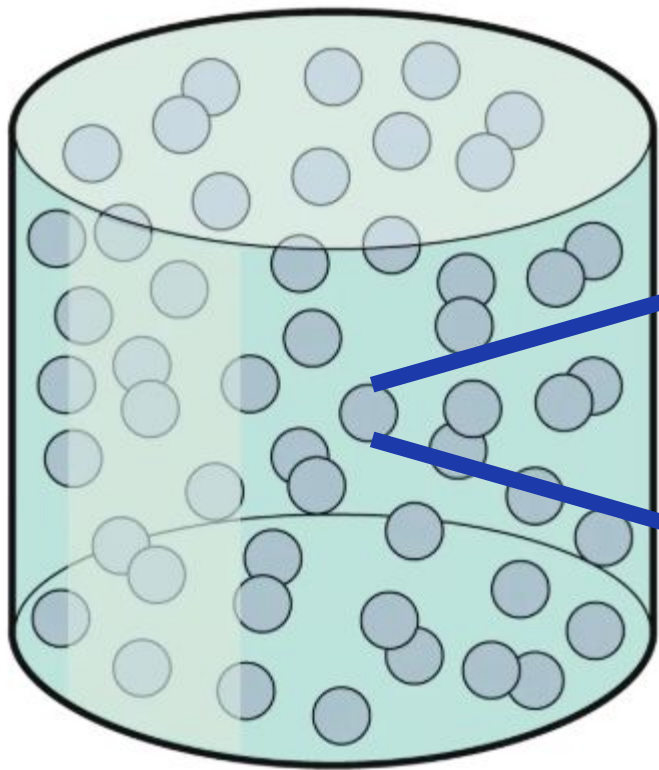
Veci sa skladajú z **atómov**.

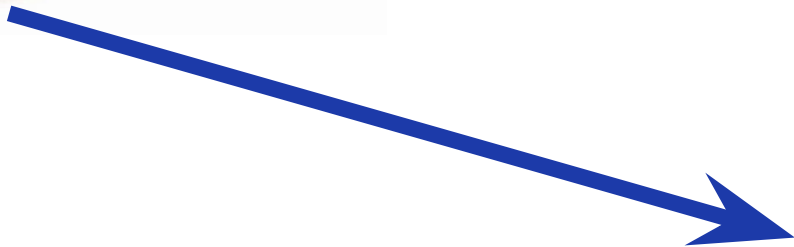
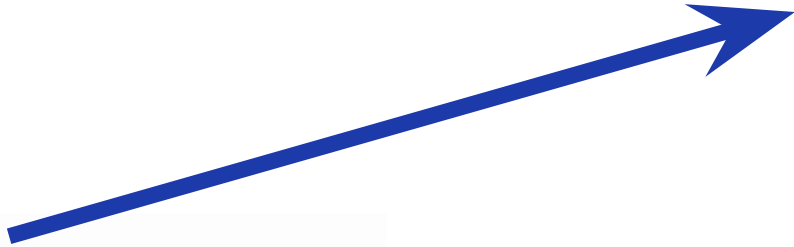
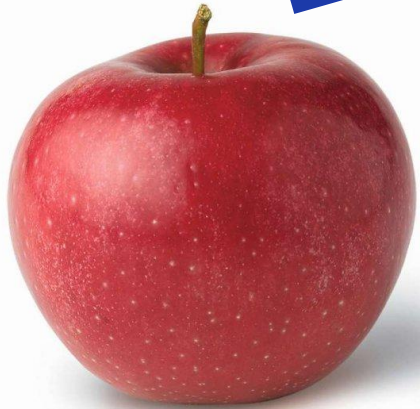
Atómy sú malé. **Fakt malé**.

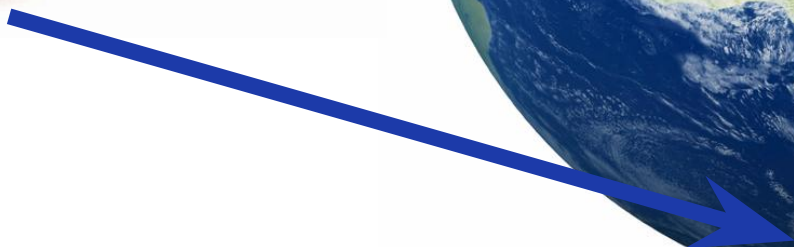
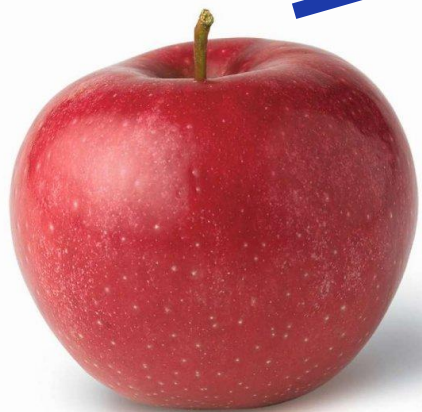
Fakt **hrozne, ukrutne, ohromne,  
nepredstaviteľne, smiešne malé**.

Velikost atómu je asi  $10^{-10}$  m.





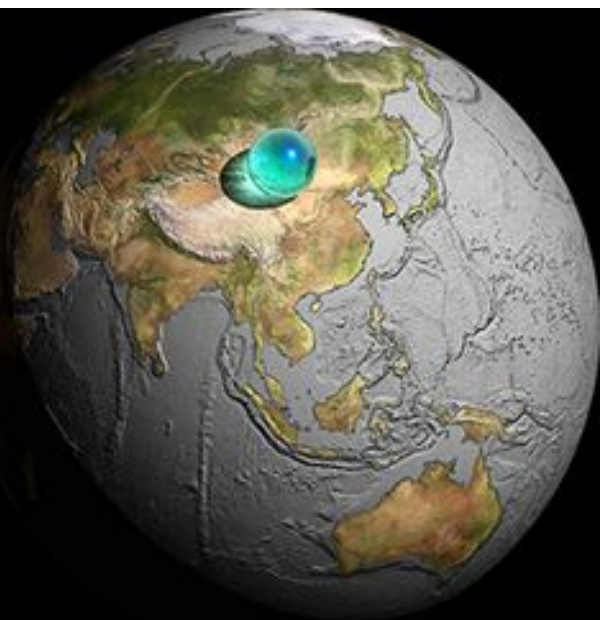
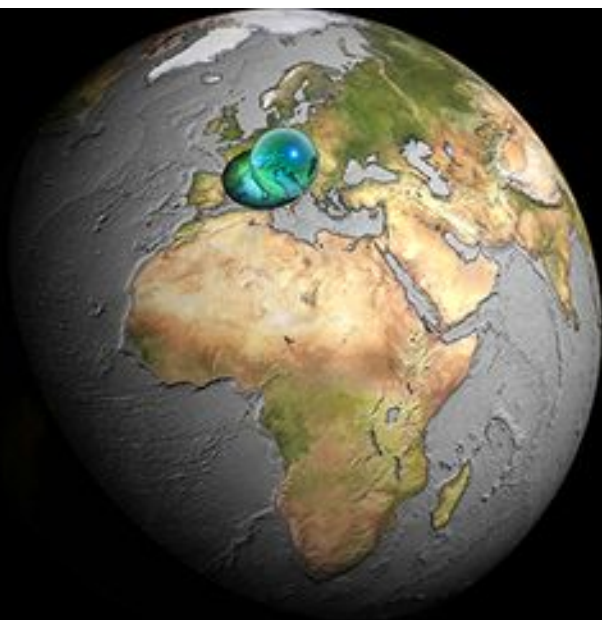
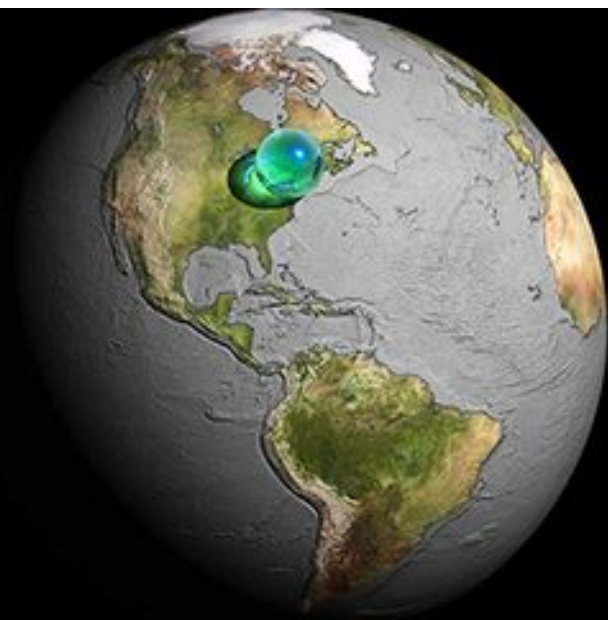




Z koľkých atómov sa veci typicky skladajú?

Z koľkých atómov sa veci typicky skladajú?

V pohári kofoly je asi  $10^{25}$  častíc.



Z koľkých atómov sa veci typicky skladajú?

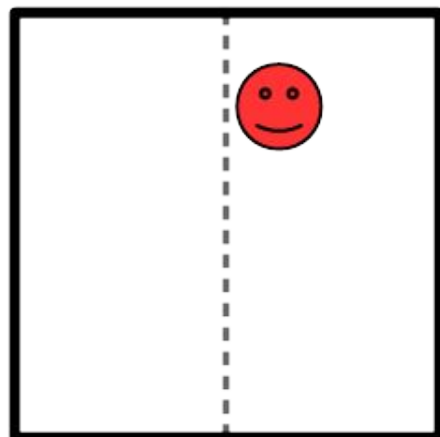
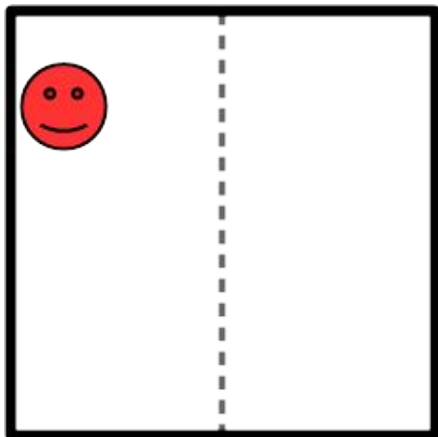
V pohári kofoly je asi  $10^{25}$  častíc.

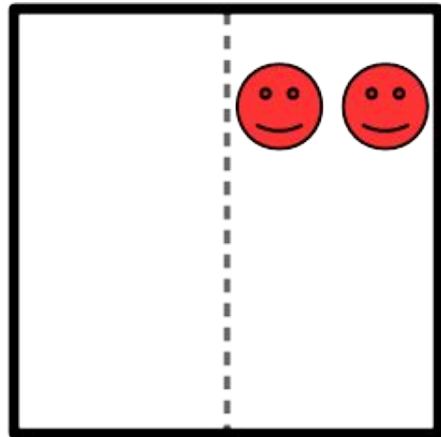
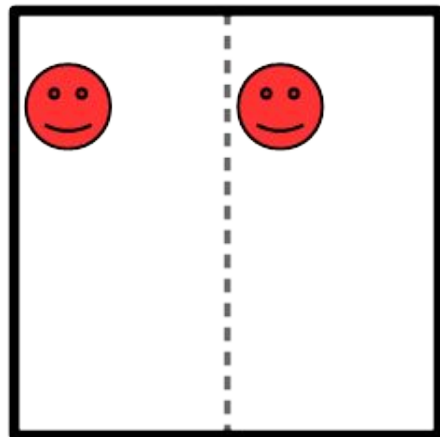
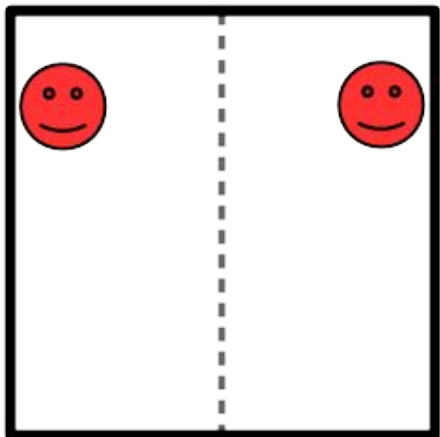
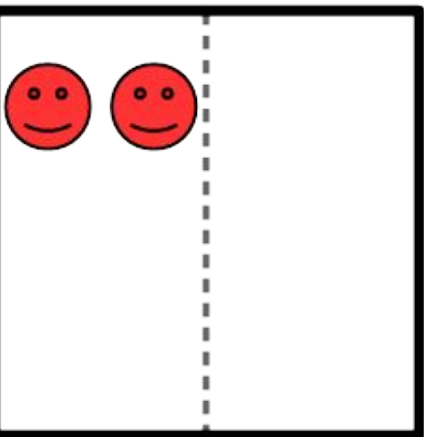
Rovnako ako pre meter kubický vzduchu.

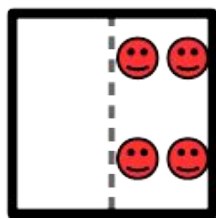
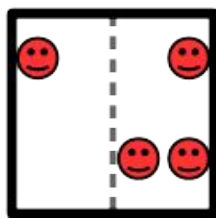
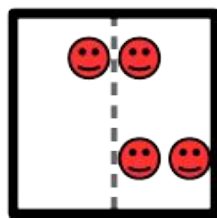
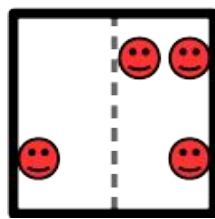
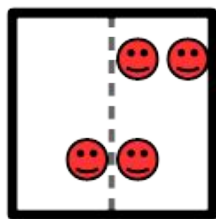
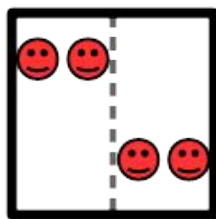
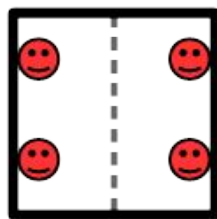
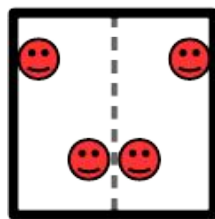
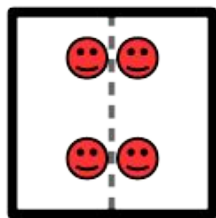
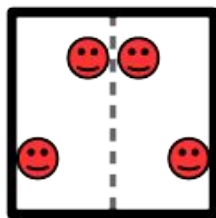
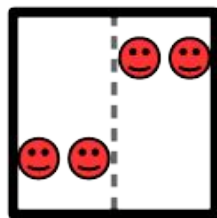
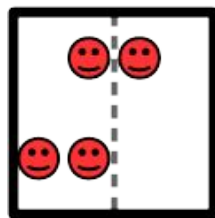
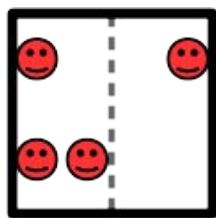
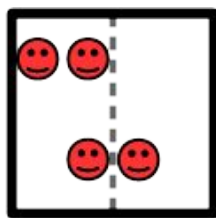
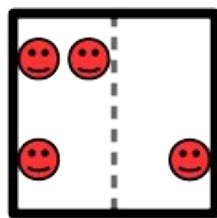
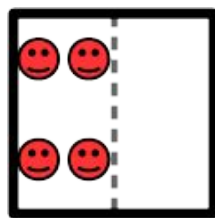
**Atómy sú malé a preto sa  
bežné veci skladajú z  
ohromného počtu častíc.**

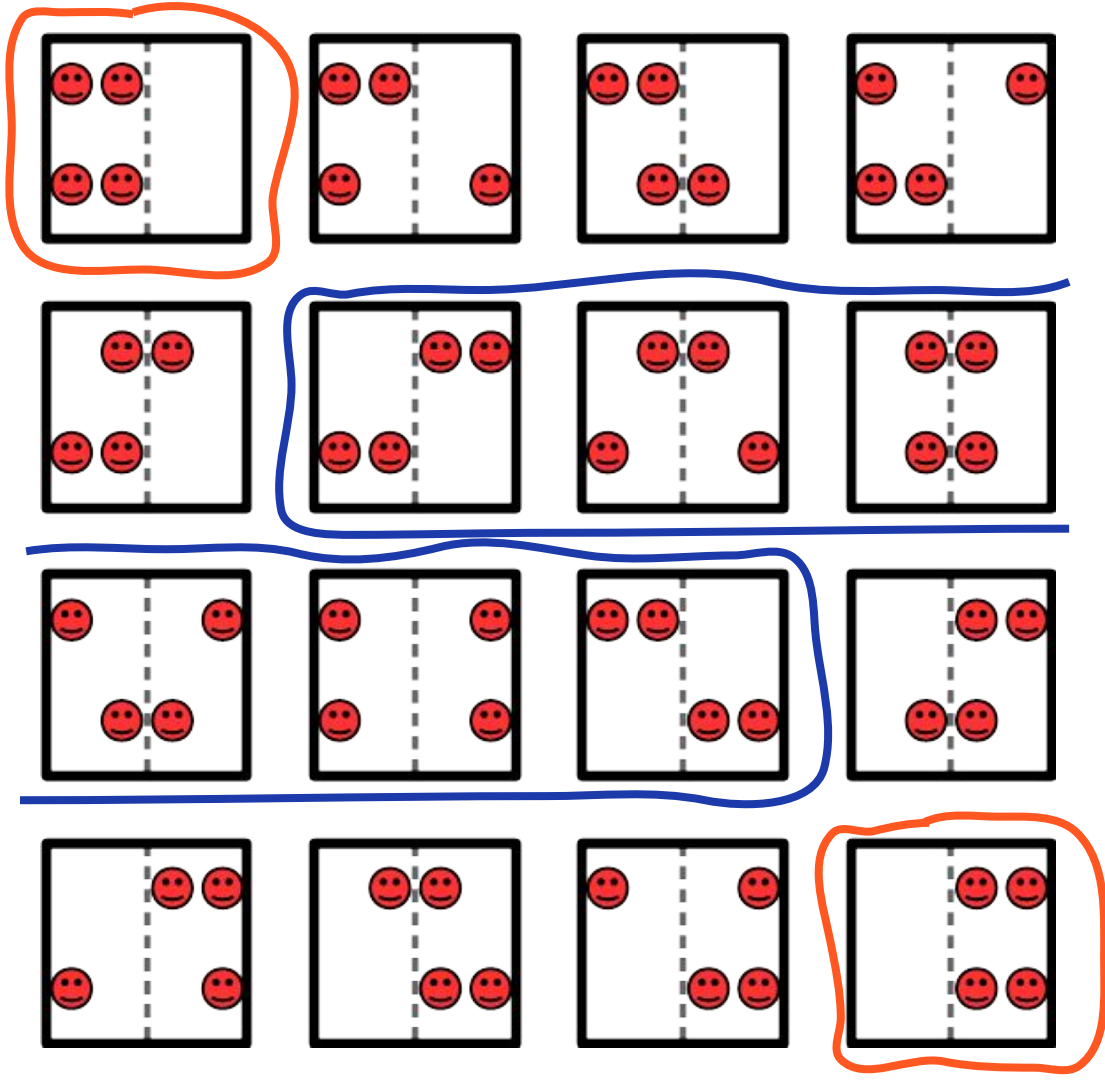




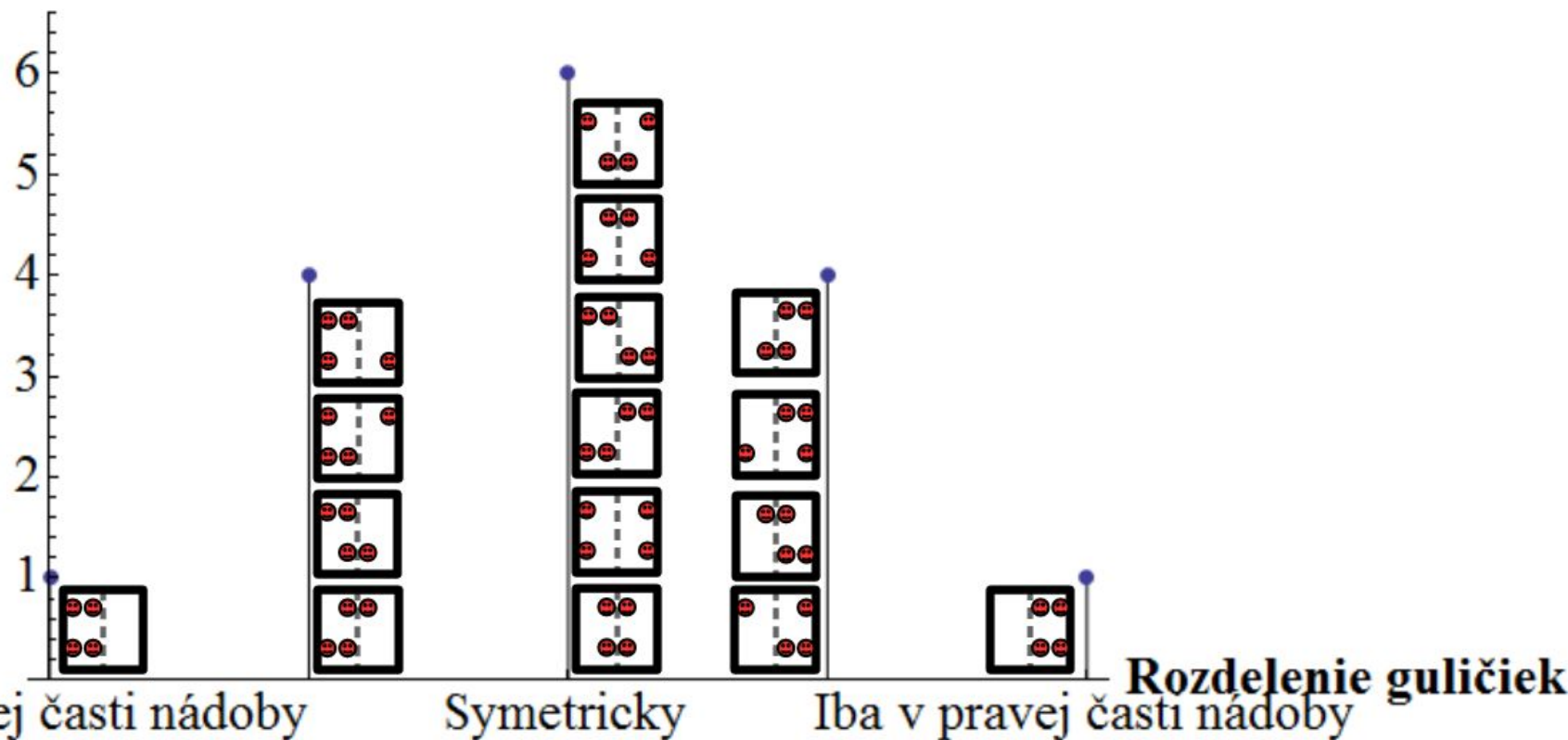






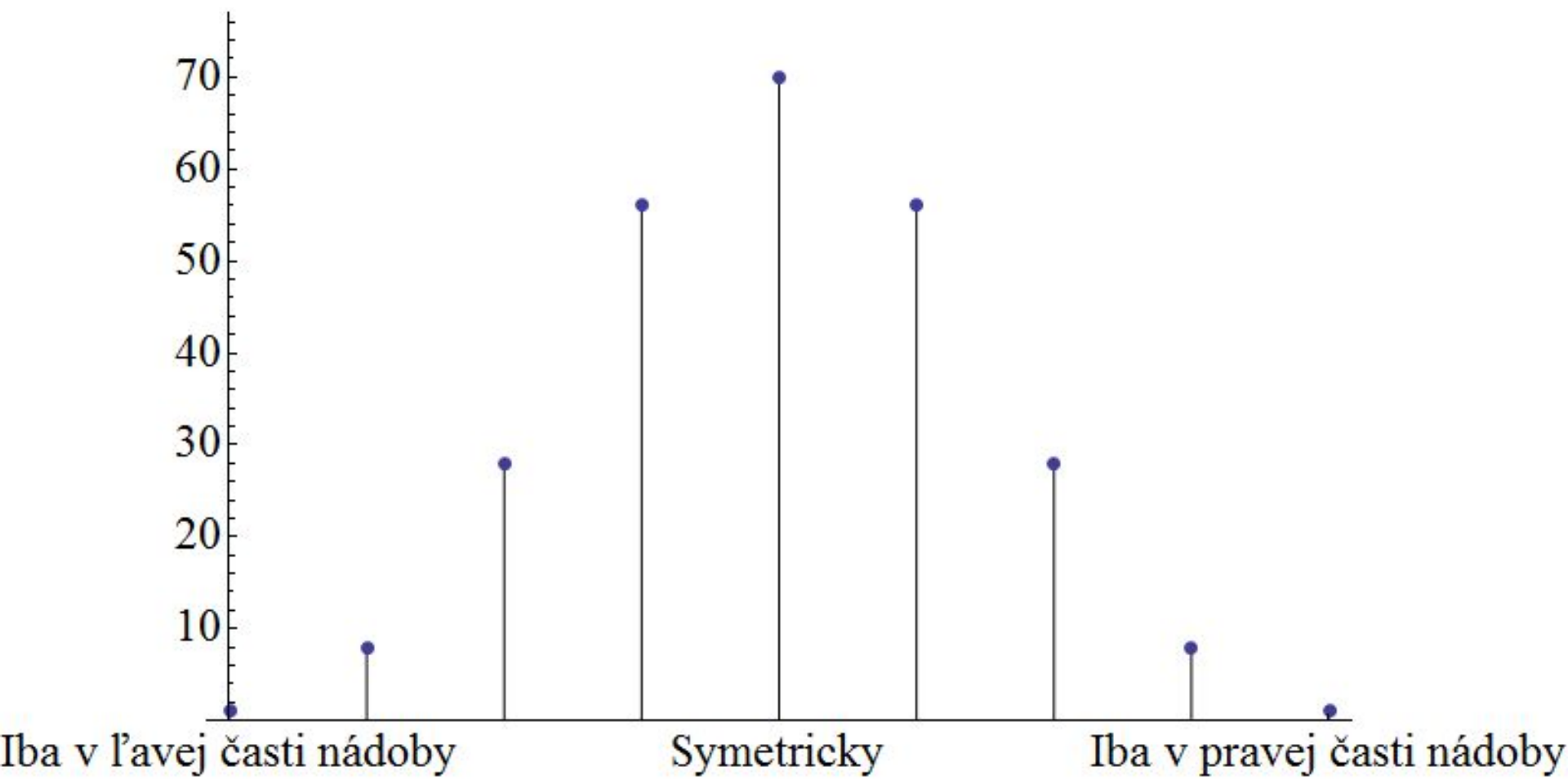


## Počet možností



# 8 guľičiek

Počet možností

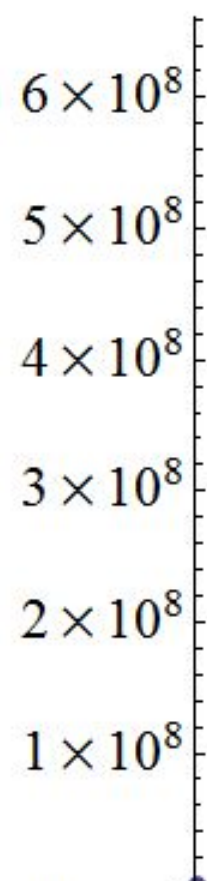






# 32 guľičiek

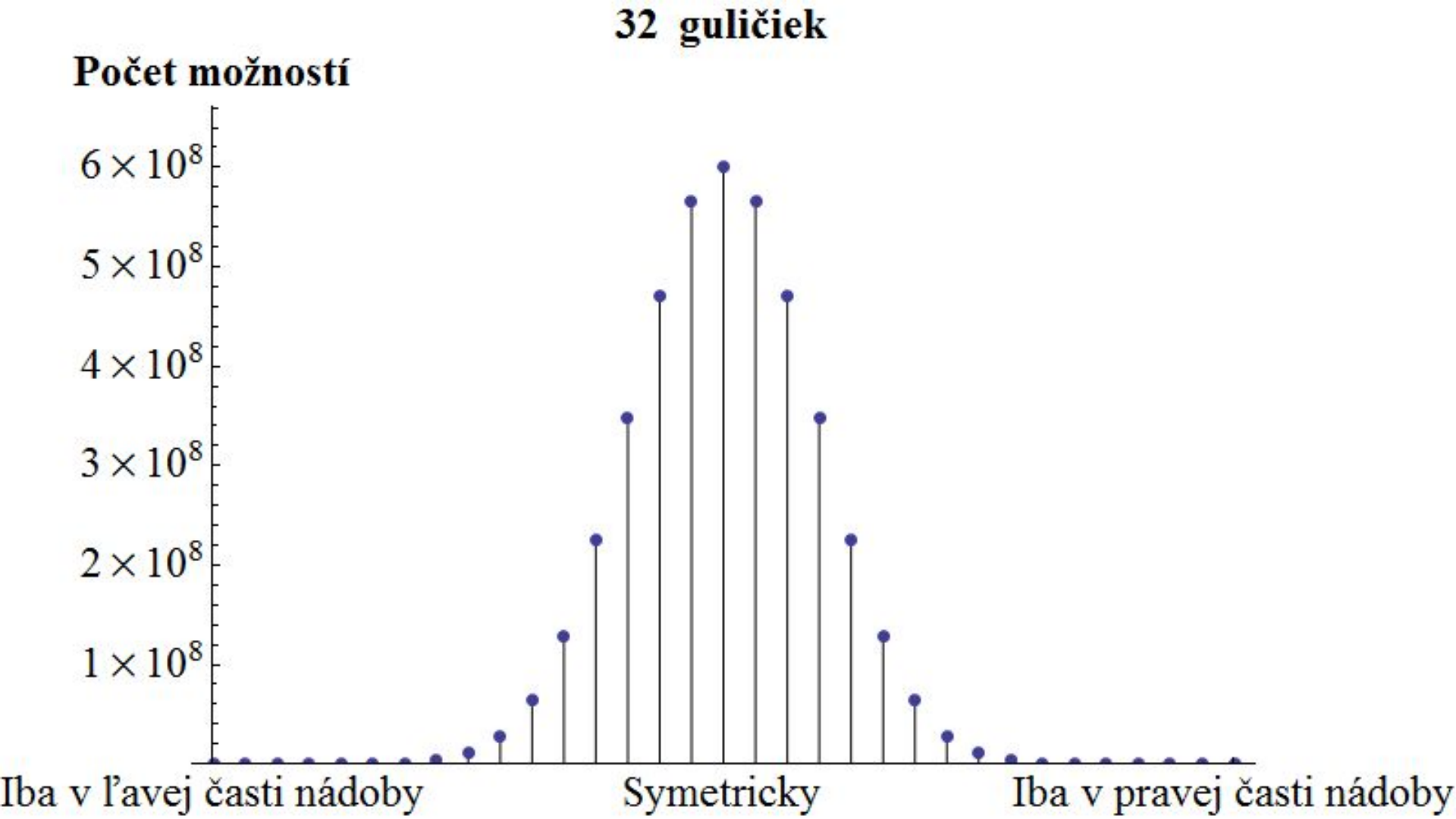
Počet možností



Iba v ľavej časti nádoby

Symetricky

Iba v pravej časti nádoby



# 64 guľičiek

Počet možností

$2.0 \times 10^{18}$

$1.5 \times 10^{18}$

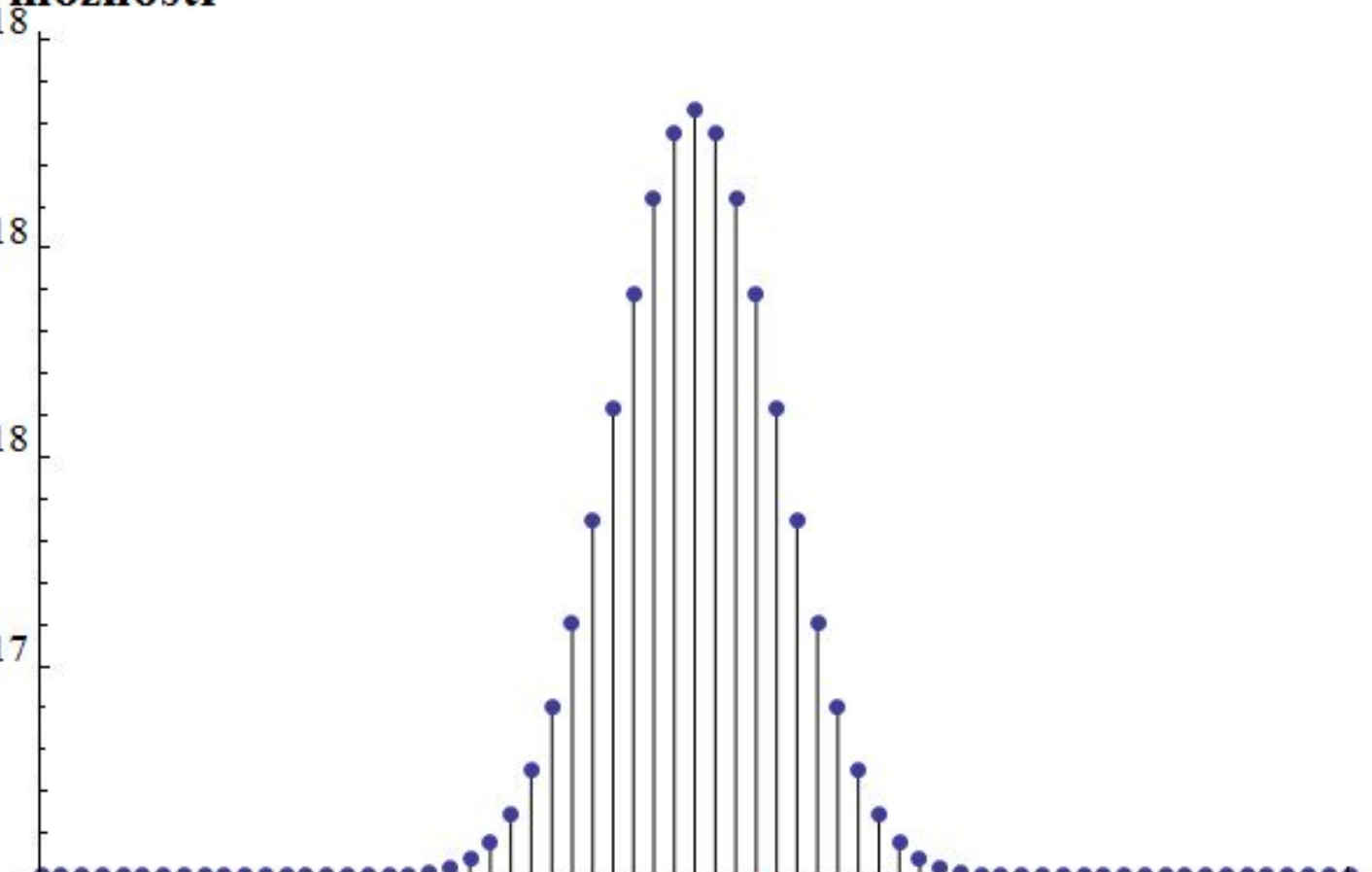
$1.0 \times 10^{18}$

$5.0 \times 10^{17}$

Iba v ľavej časti nádoby

Symetricky

Iba v pravej časti nádoby



# 128 guľičiek

Počet možností

$2.5 \times 10^{37}$

$2.0 \times 10^{37}$

$1.5 \times 10^{37}$

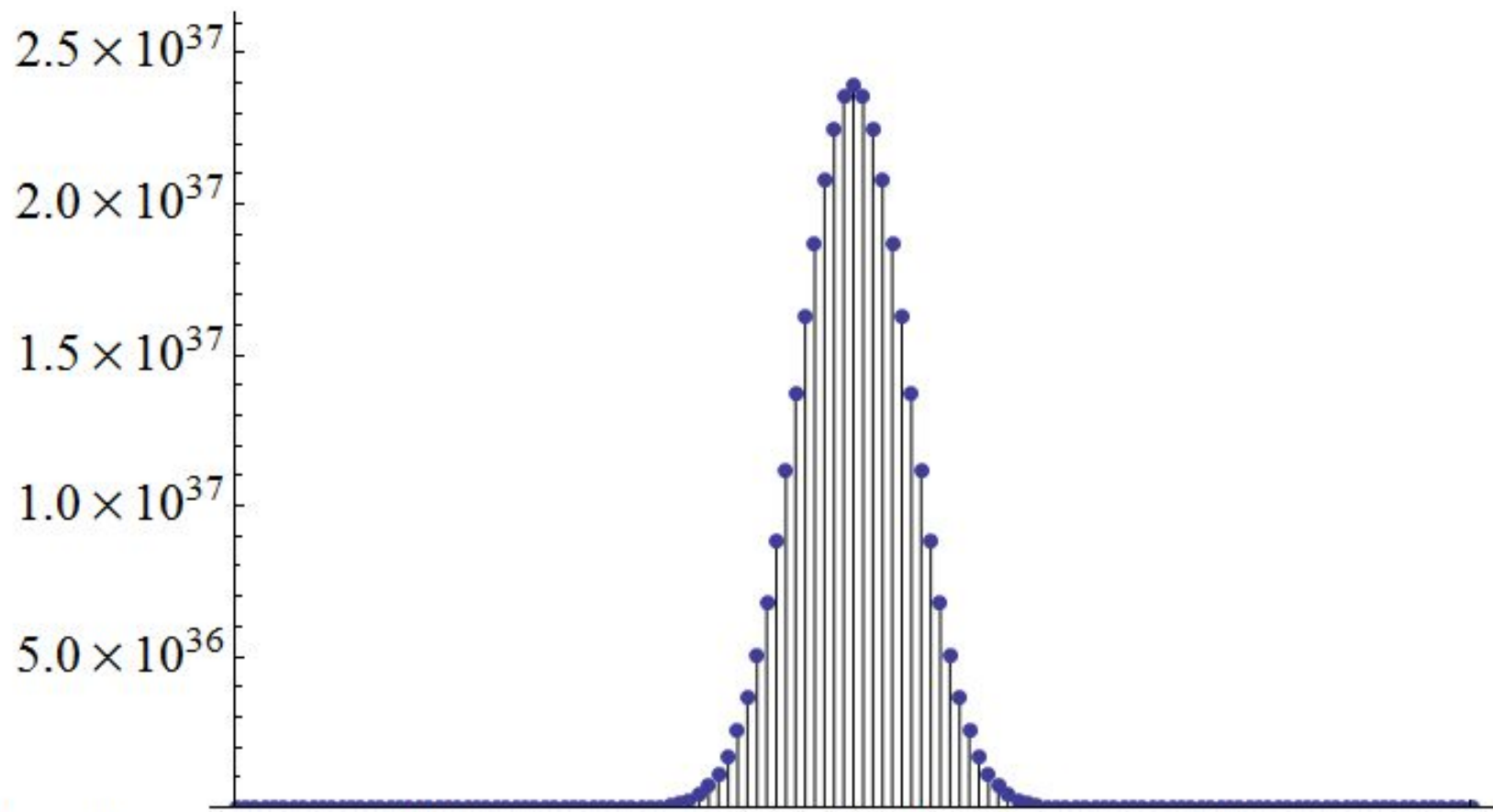
$1.0 \times 10^{37}$

$5.0 \times 10^{36}$

Iba v ľavej časti nádoby

Symetricky

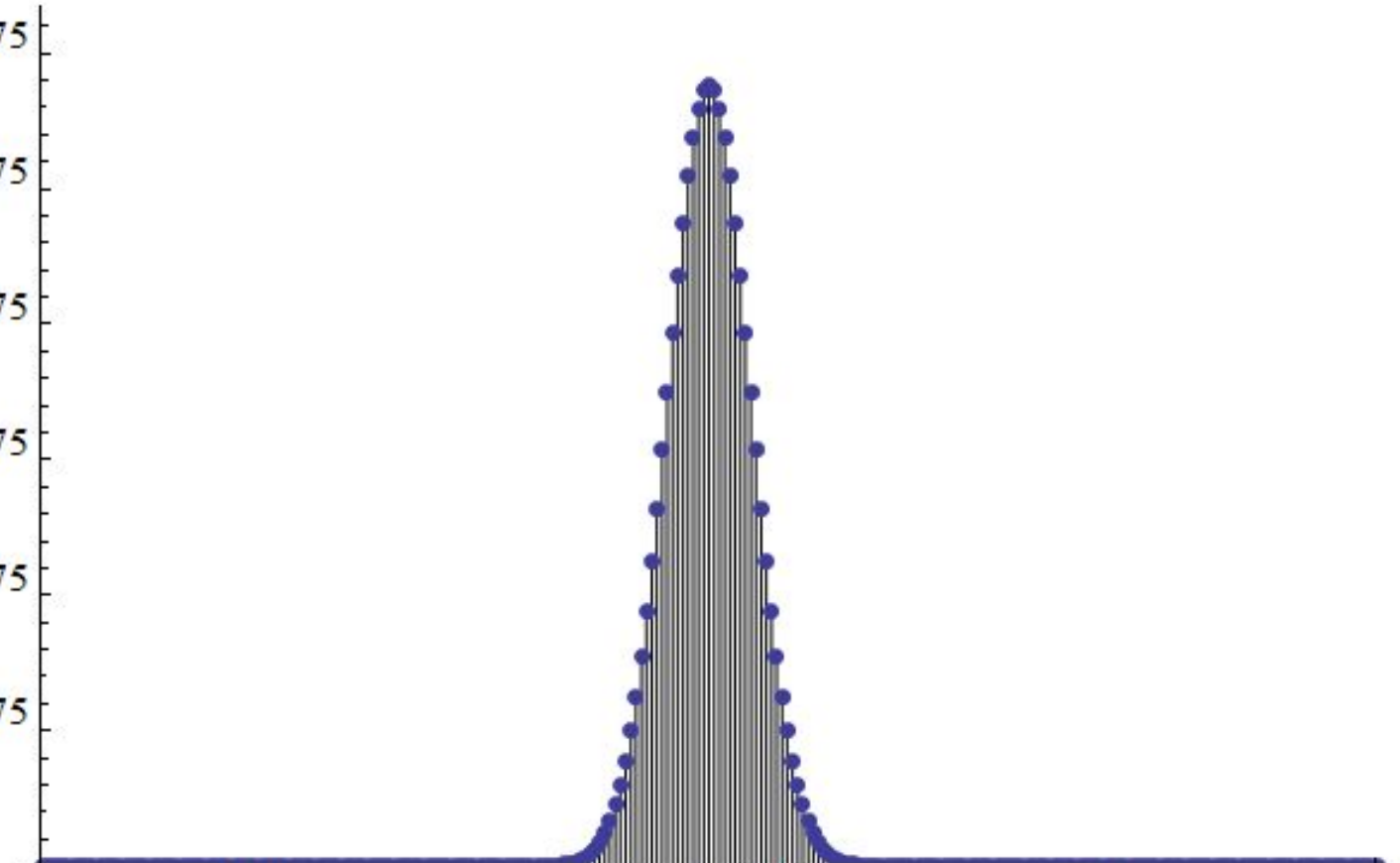
Iba v pravej časti nádoby



# 256 guľičiek

Počet možností

$6 \times 10^{75}$   
 $5 \times 10^{75}$   
 $4 \times 10^{75}$   
 $3 \times 10^{75}$   
 $2 \times 10^{75}$   
 $1 \times 10^{75}$



Iba v ľavej časti nádoby

Symetricky

Iba v pravej časti nádoby

# 16 guľičiek

Počet možností

14 000

12 000

10 000

8000

6000

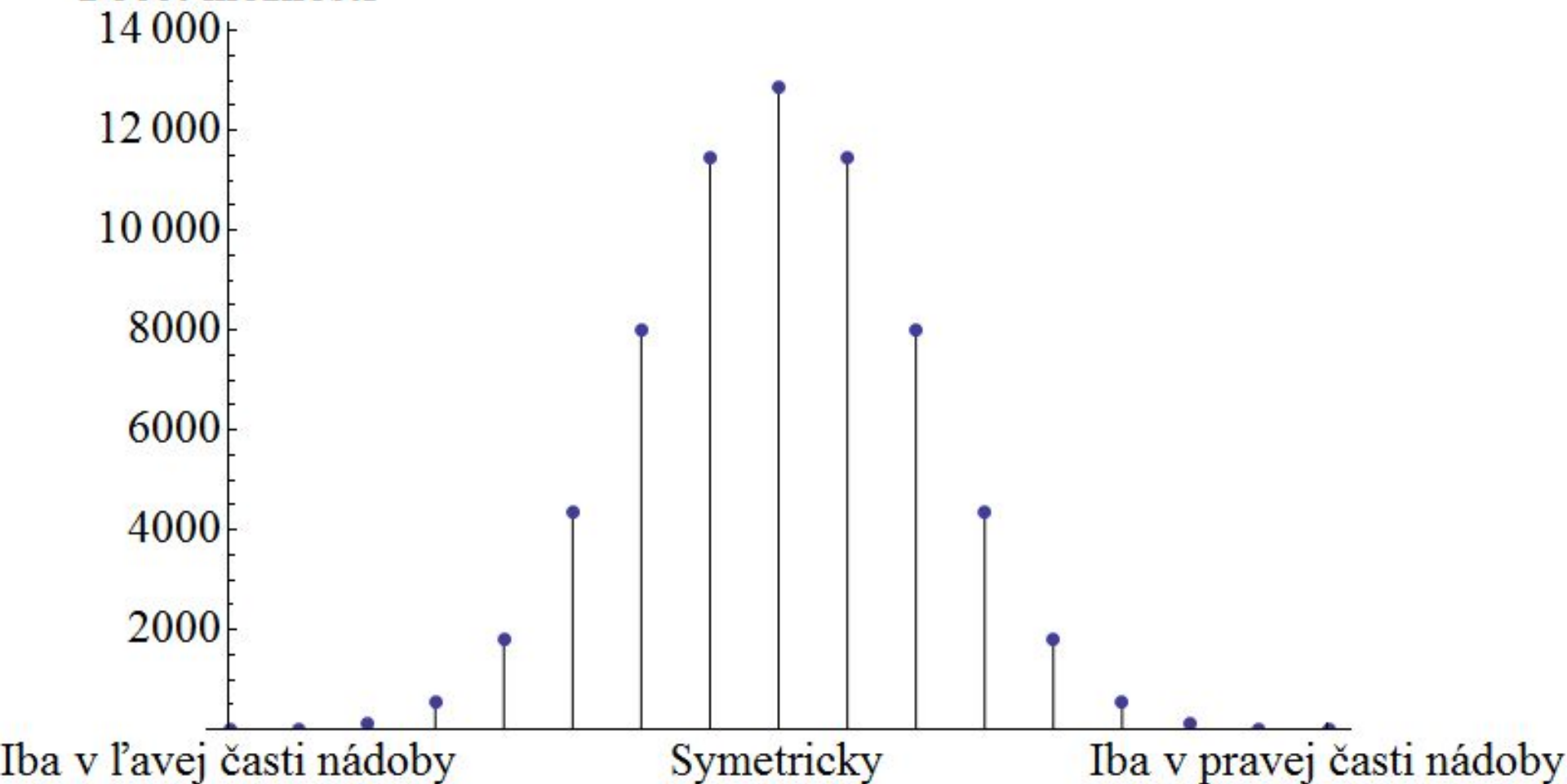
4000

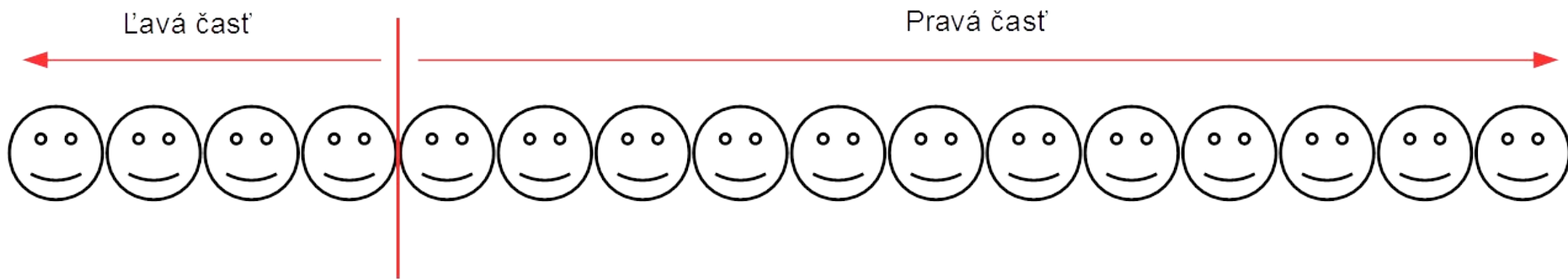
2000

Iba v ľavej časti nádoby

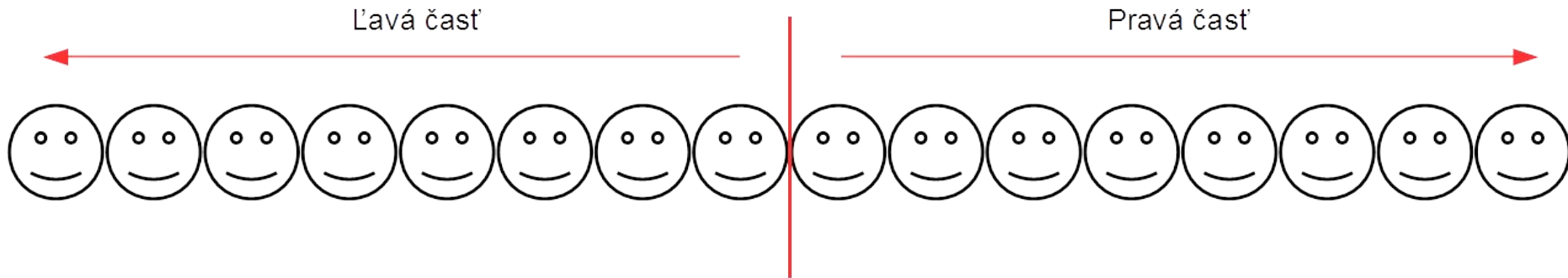
Symetricky

Iba v pravej časti nádoby





**Nesymetrická konfigurácia = vybrať 4 = málo možností**



**Symetrická konfigurácia = vybrať 8 = veľa možností**

Spôsobov, ako vybrať 8 guľičiek zo 16  
je oveľa viac ako 4 guľičky zo 16.

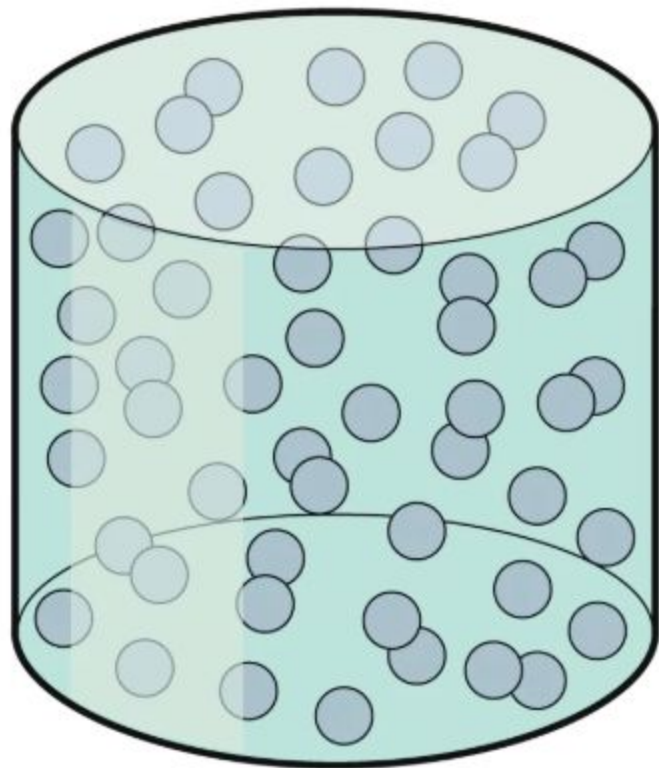
Spôsobov, ako vybrať **8** guľičiek je oveľa viac ako **4** guľičky.

Spôsobov, ako vybrať  **$N/2$**  guľičiek je oveľa viac ako  **$N/4$**  guľičiek.

Pomer tiež rastie exponenciálne.



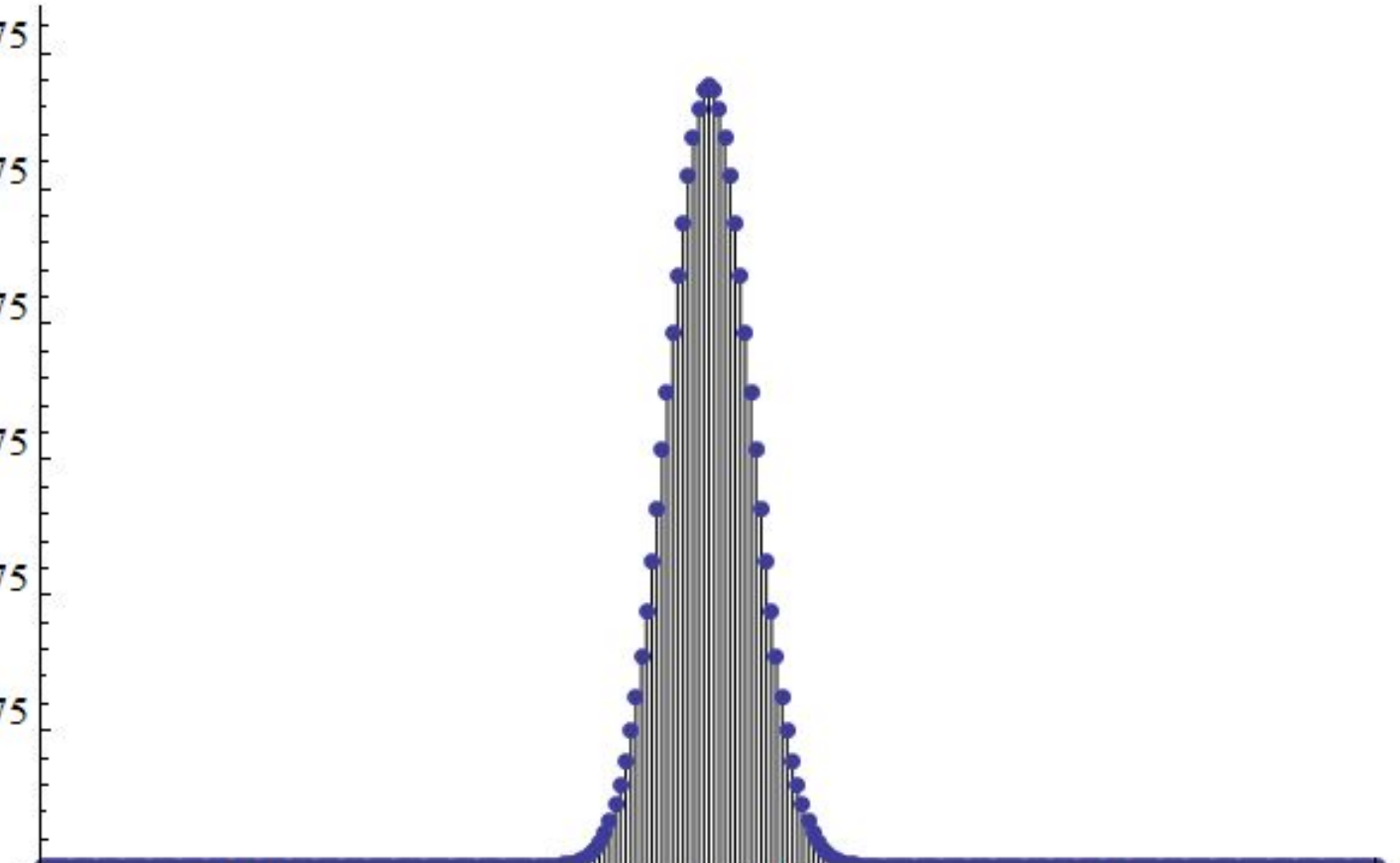
**Spät k plynom**



# 256 guľičiek

Počet možností

$6 \times 10^{75}$   
 $5 \times 10^{75}$   
 $4 \times 10^{75}$   
 $3 \times 10^{75}$   
 $2 \times 10^{75}$   
 $1 \times 10^{75}$



Iba v ľavej časti nádoby

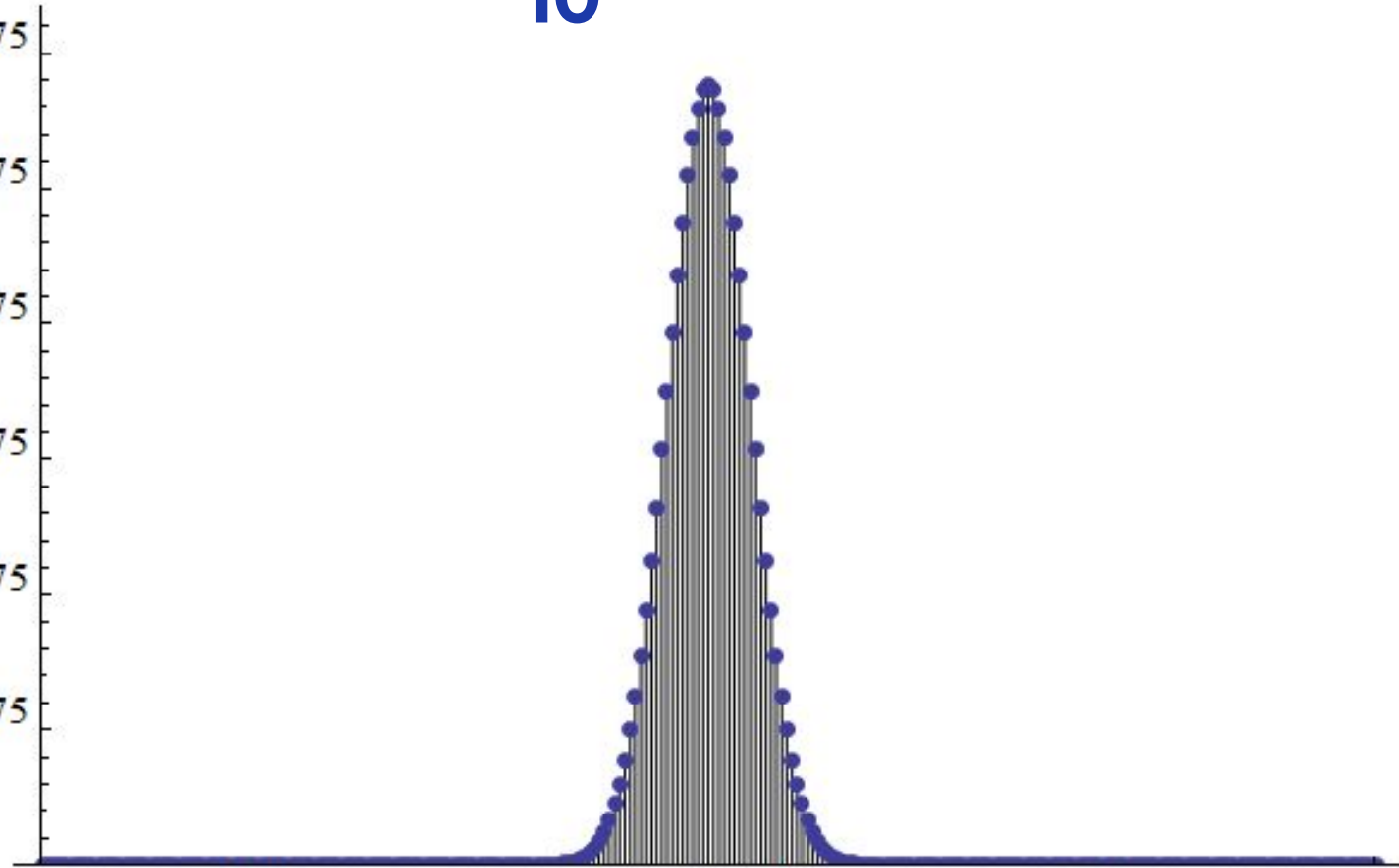
Symetricky

Iba v pravej časti nádoby

~~256~~ guľičiek  
 $10^{25}$

Počet možností

$6 \times 10^{75}$   
 $5 \times 10^{75}$   
 $4 \times 10^{75}$   
 $3 \times 10^{75}$   
 $2 \times 10^{75}$   
 $1 \times 10^{75}$



Iba v ľavej časti nádoby

Symetricky

Iba v pravej časti nádoby

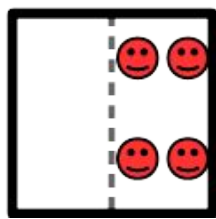
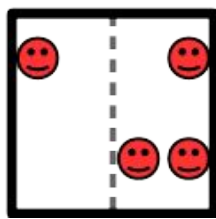
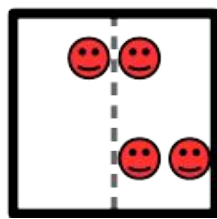
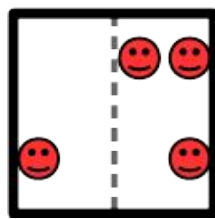
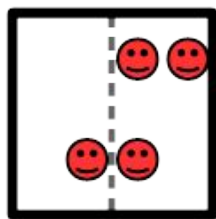
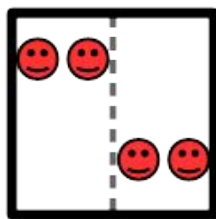
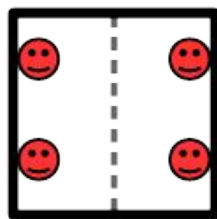
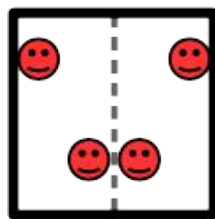
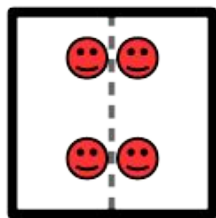
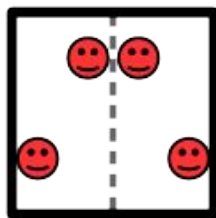
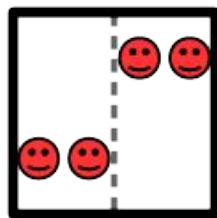
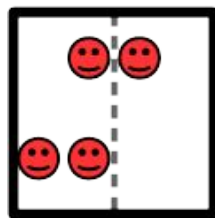
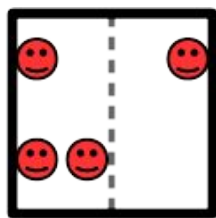
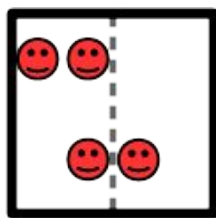
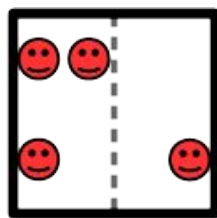
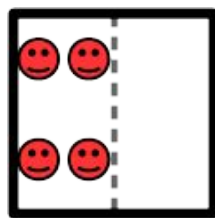


**Predpoklady**

Presné usporiadanie častíc plynu nepoznáme.

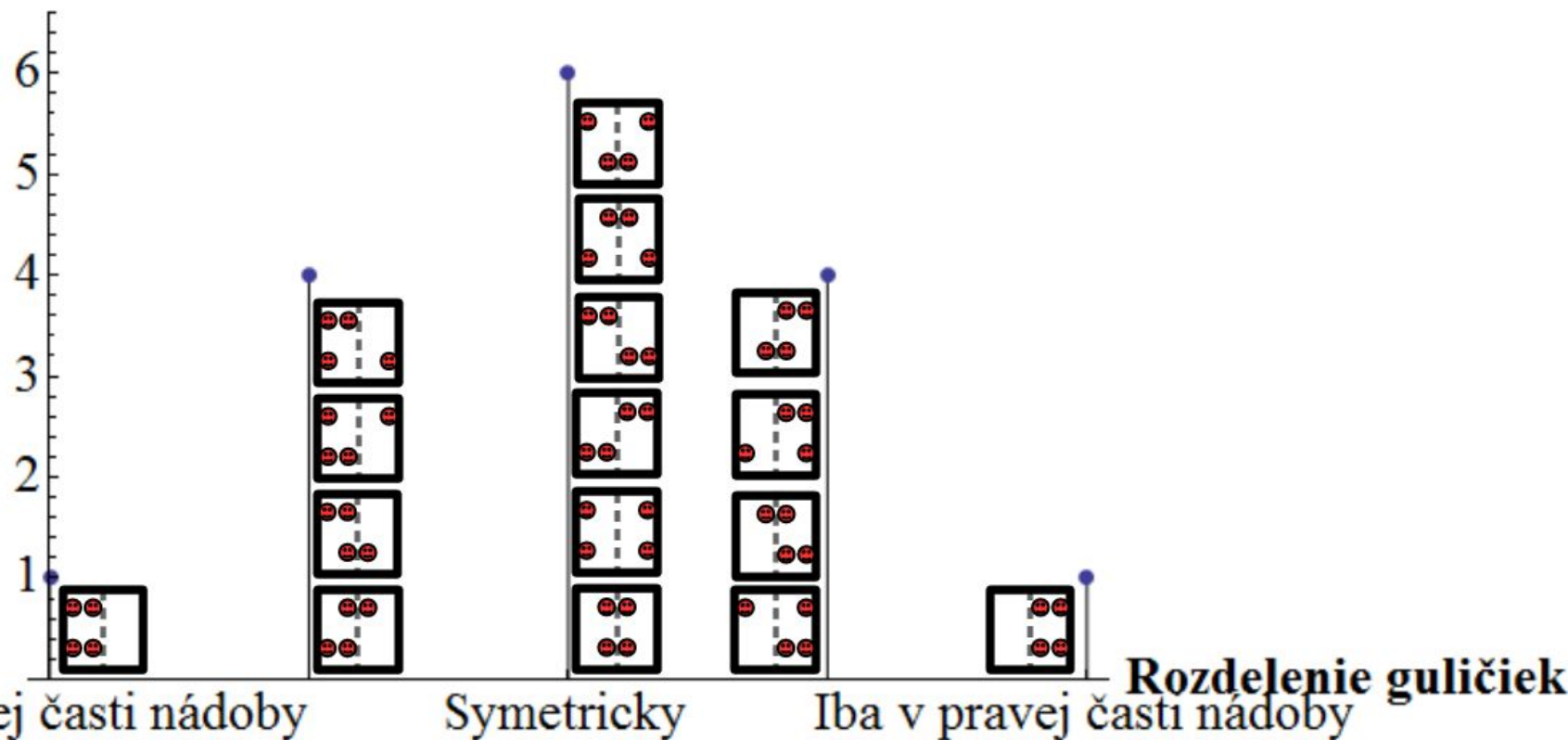
Presné usporiadanie častíc plynu nie je dôležité.

Každá konfigurácia je rovnako pravdepodobná.





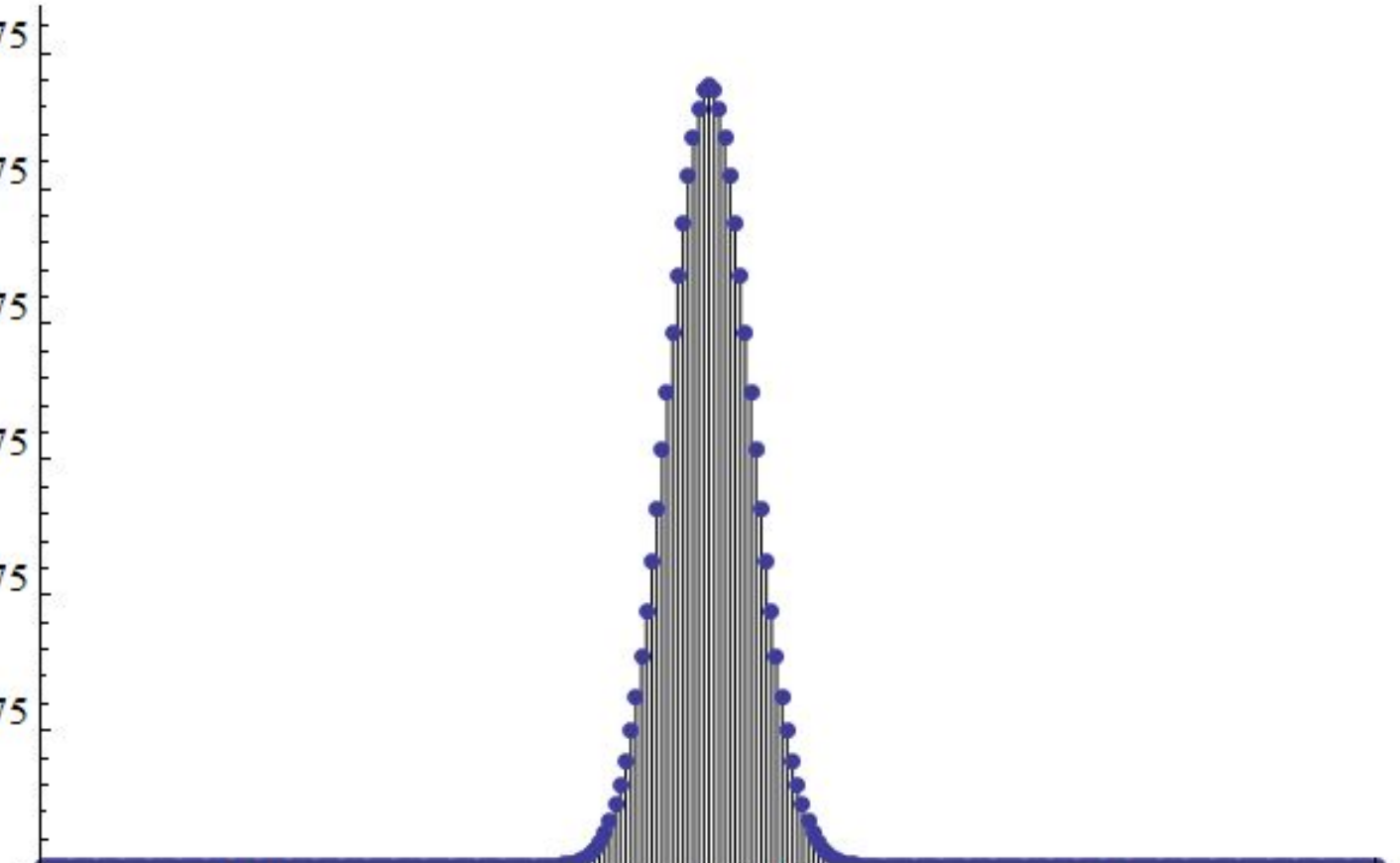
## Počet možností



# 256 guľičiek

Počet možností

$6 \times 10^{75}$   
 $5 \times 10^{75}$   
 $4 \times 10^{75}$   
 $3 \times 10^{75}$   
 $2 \times 10^{75}$   
 $1 \times 10^{75}$



Iba v ľavej časti nádoby

Symetricky

Iba v pravej časti nádoby



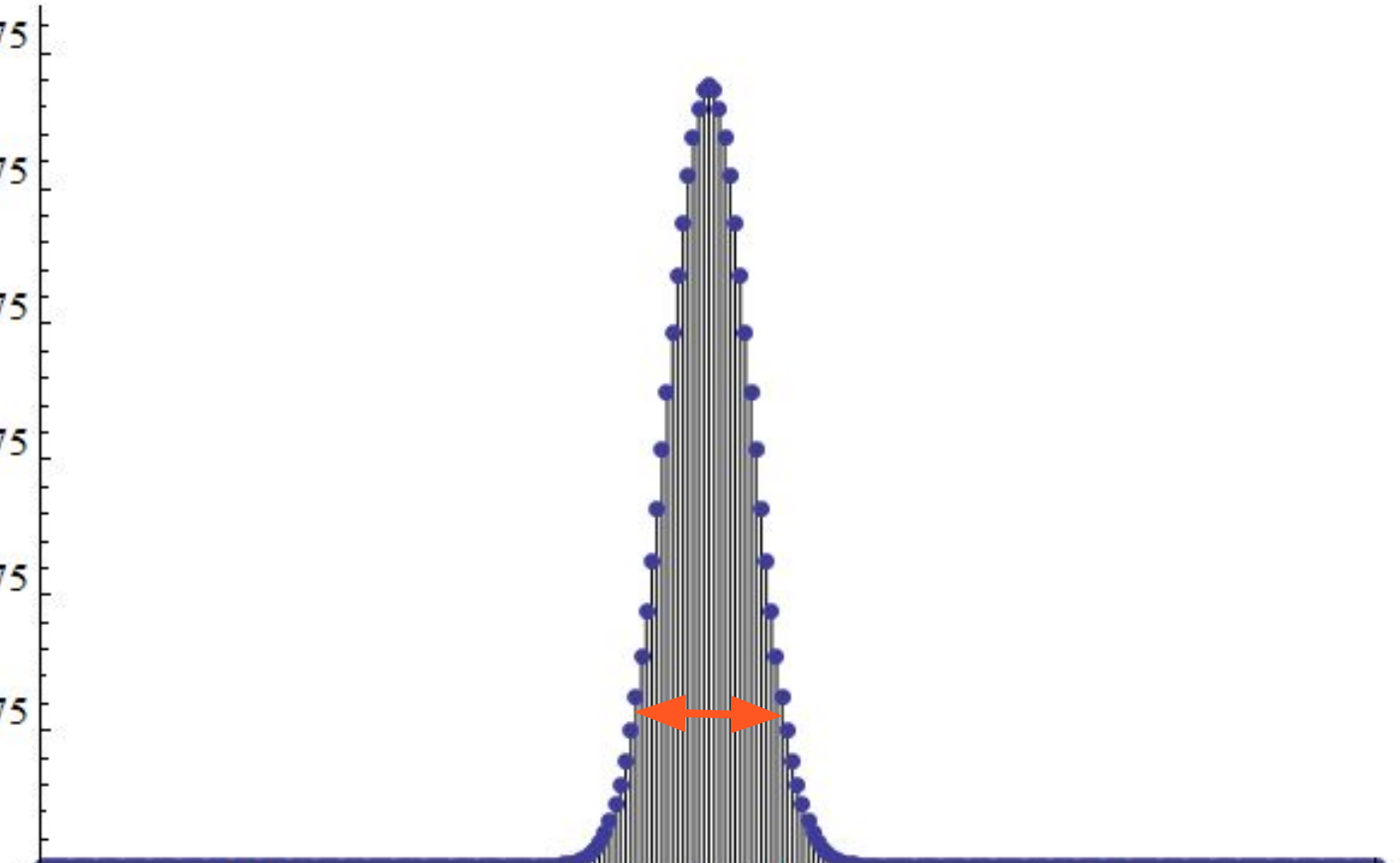
**Plyn sa rozdelí  
rovnomerne v nádobe  
preto, že akékoľvek iné  
rozdelenie je extrémne  
nepravdepodobné.**

**Fluktuácie**

# 256 guľičiek

Počet možností

$6 \times 10^{75}$   
 $5 \times 10^{75}$   
 $4 \times 10^{75}$   
 $3 \times 10^{75}$   
 $2 \times 10^{75}$   
 $1 \times 10^{75}$



Iba v ľavej časti nádoby

Symetricky

Iba v pravej časti nádoby

Náhodný proces zopakujem **N** krát.

1000 krát hodím mincou.

Náhodný proces zopakujem **N** krát.

1000 krát hodím mincou.

Výsledok očakávam približne **#·N**.

500 krát dostanem znak.



Náhodný proces zopakujem  $N$  krát.

1000 krát hodím mincou.

Výsledok očakávam približne  $\# \times N$ .

500 krát dostanem znak.

Plus alebo mínus  $\# \cdot \sqrt{N}$ .

Medzi 470 až 530 znakov.

S rastúcim  $N$  rozdiel medzi  $N$  a  $\sqrt{N}$   
narastá.

100 pokusov, 40 - 60 znakov

S rastúcim **N** rozdiel medzi **N** a  $\sqrt{N}$  narastá.

100 pokusov, 40 - 60 znakov

1000 pokusov, 470 - 530 znakov

S rastúcim **N** rozdiel medzi **N** a  $\sqrt{N}$  narastá.

100 pokusov, 40 - 60 znakov

1000 pokusov, 470 - 530 znakov

10 000 pokusov, 4 900 - 5 100 znakov

**√N**

S rastúcim **N** rozdiel medzi **N** a  $\sqrt{N}$  narastá.

100 pokusov, 40 - 60 znakov

1000 pokusov, 470 - 530 znakov

10 000 pokusov, 4 900 - 5 100 znakov

$10^{25}$  pokusov,  $\pm 10^{12}$  znakov

Počet částic v polovici nádoby fluktuuje  
na 12tej číslici.

50 000 000 000 000 000 000 000 000 000

# **Druhý termodynamický zákon**



Otázka mohla znieť aj:

Prečo sa nezohreje teplé teleso od studeného?

Prečo trenie brzdí, ale nerozbieha?

Niektoré deje sa v prírode **nedejú**,  
napriek tomu, že ich žiadny prírodný  
zákon v princípe nezakazuje.

Niektoré deje sa v prírode **nedejú**,  
napriek tomu, že ich žiadny prírodný  
zákon v princípe nezakazuje.

To sa povýši na nový zákon.

## Druhý termodynamický zákon:

Žiadny dej, ktorý sa dá použiť na ohriate teplejšieho telesa od chladnejšieho, nemôže prebiehať spontánne.

## Druhý termodynamický zákon:

Žiadny dej, ktorý sa dá použiť na ohriate teplejšieho telesa od chladnejšieho, nemôže prebiehať spontánne.

## Druhý termodynamický zákon:

Žiadny dej, ktorý sa dá použiť na ohriate teplejšieho telesa od chladnejšieho, **nemôže prebiehať spontánne.**

## Druhý termodynamický zákon:

Žiadny dej, ktorý sa dá použiť na ohriate teplejšieho telesa od chladnejšieho, nemôže prebiehať spontánne.

**Take home  
message**



**Plyn sa rozdelí  
rovnomerne v nádobe  
preto, prečo existuje veľa  
pesničiek a prečo  
neporazíte veľmajstra  
náhodnými ťahmi.**

**Ďakujem za  
pozornosť!**

**Morálne  
ponaučenie**

Veda je veľmi **dôležitá a užitočná**. Jej výsledky robia život z veľkej časti takým, aký je.

Veda je veľmi **dôležitá a užitočná**. Jej výsledky robia život z veľkej časti takým, aký je.

Veda a porozmenie svetu je tiež **zaujímavé a poučné**. Môže prinášať radosť a potešenie.

**Poznámka**

Počet částic v polovici nádoby fluktuuje  
na 12tej číslici.

Počet častíc v polovici nádoby fluktuuje na 12tej číslici.

V bežnej nádobe. V menších nádobách sú relatívne fluktuácie väčšie.



**Entropia**

## Druhý termodynamický zákon:

Entropia (S) pri spontánných dejoch neklesá.

$$dS \geq 0$$

Entropia súvisí s počtom spôsobov,  
ktorými sa dá makroskopická situácia  
realizovať.

Entropia súvisí s počtom spôsobov,  
ktorými sa dá makroskopická situácia  
realizovať.

