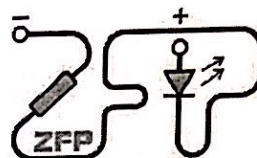


51 - 0 KOLIK? JAKO PRO BLBY!

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

# Fyzikální praktikum I (NOFY066)



Úloha č. XVI.

Název úlohy: Stanovení Brownova pohybu

Jméno: Josef Kučera

Obor: FOF

Datum měření: 23.4.2019.

Datum odevzdání: 30.4.2019.

Připomínky opravujícího:

- 1.) Aktivita Brownova pohybu  $A$  je nejlépe vyjádřena pomocí lineární regrese!
- 2.) Další nepřesnosti způsobuje odraz světla - osvětlením mikroskopu.
- 3.) dlejší postup měření - experimentu! dlejší popis aparatury a použití softwaru!

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 3	3
Teoretická část	0 - 2	2
Výsledky a zpracování měření	0 - 9	7
Diskuse výsledků	0 - 4	2
Závěr	0 - 1	1
Seznam použité literatury	0 - 1	1
<b>Celkem</b>	max. 20	16

Posuzoval: Michal Koc

dne: 6.5.2019

\* \* \* \* DOCELA BŽUNDA, ČLOVĚK BY SE MĚL SOUSTŘEDIT, KDYŽ KLÍK!

## Pracovní úkol

1. Experimentálně ověřte platnost vztahu pro časovou závislost středního kvadratického posunutí částice  $\overline{s^2}$  při Brownově pohybu.
2. Určete aktivitu Brownova pohybu  $A$  částic latexu ve vodě za pokojové teploty.
3. Vypočtete Avogadrovu konstantu  $N_A$ .

## Theorie

Brownovým pohybem se nazývá ustavičný, chaotický pohyb malých částic rozptýlených v kapalině nebo plynu.

V případě pohybu v rovině platí pro průmět středního kvadratického posunutí částice do zvoleného směru při Brownově pohybu  $s^2$  za čas  $t$  vztah

$$\overline{s^2} = 2A \cdot t \quad (1) \quad \checkmark$$

kde  $A$  je tzv. aktivita Brownova pohybu. Pro danou částici a prostředí je při stálé teplotě  $A$  konstantní.

Pro postupný Brownův pohyb kulové částice hmotnosti  $m$  a poloměru  $r$ , která se nachází v prostředí charakterizovaném teplotou  $T$  a dynamickou viskozitou  $\eta$ , lze konstantu  $A$  vyjádřit vztahem [2]

$$A = \frac{RT}{3\pi\eta r N_A} \quad (2) \quad \checkmark$$

kde  $R$  je molární plynová konstanta,  $N_A$  je Avogadrova konstanta.

Označíme-li naměřené vzdálenosti sousedních bodů  $s_t$ , vzdálenosti bodů  $i$  a  $i + 2$  jako  $s_{2t}$ , vzdálenosti bodů  $i$  a  $i + 3$  jako  $s_{3t}$ , potom platí podle vztahu (1) pro střední hodnoty kvadrátů těchto vzdáleností vztah

$$\overline{s_t^2} : \overline{s_{2t}^2} : \overline{s_{3t}^2} = t : 2t : 3t \quad (3) \quad \checkmark$$

Je-li shoda dostatečná, můžeme naměřené hodnoty použít k výpočtu aktivity Brownova pohybu částic latexu a k výpočtu Avogadrovky konstanty.

Viskozita suspenze závisí na koncentraci částic. Pro zředěnou suspenzi masivních tuhých koulí lze odhadnout relativní viskozitu  $\eta_{rel}$ , tj. podíl viskozit suspenze a čisté kapaliny ze vzorce

$$\eta_{rel} = 1 + 2,5\varphi \quad (4) \quad \checkmark$$

kde  $\varphi$  je objemový podíl částic.

## Výsledky měření

Nejprve jsme si změřili, jak dlouhá jest prodleva mezi dvěma zvukovými intervaly. Pro 10 intervalů nám vyšel čas 48,06 s, což znamená, že  $t = 4,806$  s. ✓

Molární plynová konstanta  $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  nám byla známa ze zadání. ✓

Dynamickou viskozitu vody  $\eta_{\text{H}_2\text{O}} = 89 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  jsme si našli v tabulkách [3].

Dle vzorečku (4), jsme při znalosti  $\varphi = \frac{1}{10\,000}$  vypočítali  $\eta_{\text{rel}}$ , kterou jsme použili pro výpočet celkové viskozity vody a částic  $\eta_c$  dle vztahu

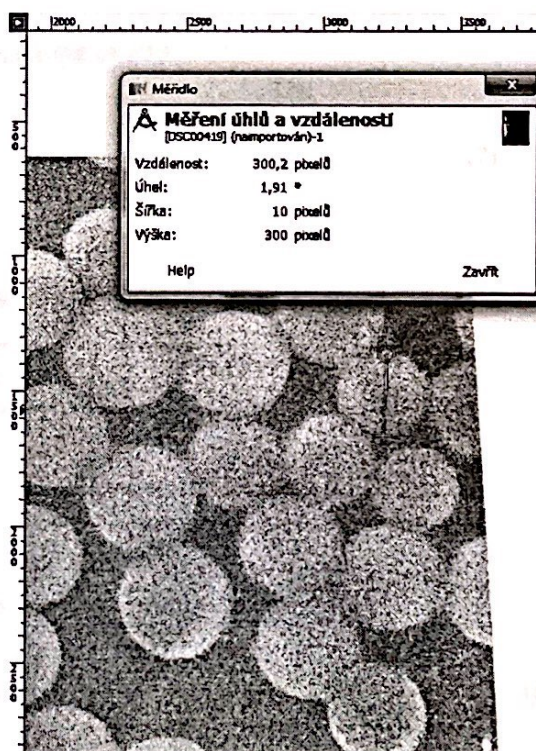
$$\eta_c = \eta_{\text{rel}} \cdot \eta_{\text{H}_2\text{O}} \quad (5) \quad \checkmark$$

Pro výpočet poloměru částic latexu na obrázku z transmisního elektronového mikroskopu byla kvůli větší přesnosti využita metoda pořízení digitálního snímku oskenováním papíru a následné změření průměru částic v programu GIMP pomocí funkce měřidlo s přesností na pixely.

Se znalostí, že měřítko  $1 \mu\text{m}$  jest dlouhé 930 px jsme snadno vypočítali poloměry 10 zvolených částic.

Tabulka 1: Měření poloměru  $r$  částic

d [px]	d [ $\mu\text{m}$ ]	r [ $\mu\text{m}$ ]
410,5	0,44	0,22
366,9	0,39	0,20
408,1	0,44	0,22
406,3	0,44	0,22
390,1	0,42	0,21
370,5	0,40	0,20
370,5	0,40	0,20
380	0,41	0,20
310	0,33	0,17
300	0,32	0,16



Průměrná hodnota  $r$  nám pak vychází  $0,20 \mu\text{m}$ . ✓

Pro výpočet aktivity částic latexu při Brownově pohybu platí přeepsaná rovnice (1)

$$A = \frac{\overline{s^2}}{2t} \quad (6) \quad \checkmark$$

Naměřená data pro různě se posouvající částice jsou v tabulce 2, kde jest rovnou ze středních kvadratických posunutí vypočítána aktivita Brownova pohybu.

Tabulka 2: Střední kvadratická posunutí  $\overline{s^2}$  a aktivita  $A$

měření	$\overline{s_t^2} : \overline{s_{2t}^2} : \overline{s_{3t}^2}$	$\overline{s^2} [\mu\text{m}^2]$	$u_{\overline{s^2}} [\mu\text{m}^2]$	$A [\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
1.	1 : 2,06 : 3,08	19	6	1,98
2.	1 : 2,40 : 4,15	13	2	1,35
3.	1 : 2,24 : 3,14	18	5	1,87
4.	1 : 1,96 : 2,71	21	3	2,18
5.	1 : 1,69 : 2,43	11	3	1,14

Z tabulky 2 můžeme vyčíst, že 2. a 5. měření bychom měli z výpočtů Avogadrovy konstanty  $N_A$  vyloučit, neboť neodpovídají vztahu (3).

Pro výpočet Avogadrovy konstanty  $N_A$  si ji nejprve vyjádříme ze vztahu (2)

$$N_A = \frac{RT}{3\pi\eta_c r A} \quad (7) \quad \checkmark$$

Pro naše měření pak dostáváme hodnoty Avogadrovy konstanty:

měření	$N_A [\cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}]$
1.	7,5
2.	11
3.	7,9
4.	6,8
5.	13

Vidíme, že nejvíce se svou hodnotou od skutečné hodnoty Avogadrovy konstanty  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$  ona nejméně přesná měření 2. a 5., což nám posvěcuje jejich vyloučení.

Wii?

*Diskuse dalších možných chyb: teplota, měření slinivku částic, atd!*

## Diskuse

Pro naše naměřené hodnoty  $r$  jsme vypočítali celkovou chybu  $u_{\bar{m}}$  dle vzorce pro výpočet přímého měření [1]:

$$u_{\bar{m}} = \sqrt{(k_{1\sigma} \cdot S_{\bar{m}})^2 + (\Delta m)^2} \quad (8) \quad \checkmark$$

kde  $k_{1\sigma}$  jest studentův koeficient pro interval jistoty  $1\sigma$ ,  $S_{\bar{m}}$  jest směrodatná odchylka aritmetického průměru a  $\Delta m$  jest mezní chyba použité měřicí aparatury

Vzhledem k tomu, že  $\Delta m$  se nám podařilo snížit díky využití elektronického měření na počítači na velikost několika málo pixelů, celková chyba  $u_{\bar{m}}$  nám vyšla  $\pm 0,008 \mu\text{m}$ , což jest zanedbatelná chyba.

Bohové Olympu, zvláště pak ctěná Pallas Athéna, nám byli též příznivě nakloněni a seslali nám okolní teplotu  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , pro kterouž v tabulkách matematicko-fyzikálních jestiž uvedena *viskosita* vody  $89 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , a jelikož jsme též provedli korekci viskosity pro vodu s částicemi, můžeme hrdě prohlásiti, že odtud též nepramenila naše dominantní chyba.

Dominantní chyba pramenila jednak z reakční doby neschopného člověka, který tuto úlohu měřil – mě, dále pak ze samotného vzorce pro střední kvadratické posunutí částice v rovině (1). Částice se totiž reálně pohybovala ve všech 3 dimensích, jelikož bylo nutnět částici neustále zaostřovati, aby se nám nevytratila z obrazu.

Pokud do 3 schválených měření za  $\overline{s^2}$  dosadíme minimální a maximální hodnotu, dostaneme maximální interval (vzhledem k tomu, že ostatní faktory jsou pro výpočet chyby prakticky zanedbatelné), ve kterém se Avogadrova konstanta může nacházet:

$$5,93 - 10,95 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

## Závěr

*Aktivita Brown. pohyb*

Při pěti měřeních se nám povedlo stanovit 3 různé aktivační energie pro měření, která splňovala podmínky Brownova pohybu.

$$A_1 = 1,98 \mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$A_2 = 1,87 \mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$A_3 = 2,18 \mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro které nám poté vyšly hodnoty Avogadrových konstant

$$N_A = 7,5 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$N_A = 7,9 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$N_A = 6,8 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Maximální interval nejistoty pak činil  $5,93-10,95 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , ve kterém se Avogadrova konstanta nachází.

## Literatura

- [1] Brož, J. a kol.: Základy fyzikálních měření I. SPN, Praha 1983, čl. 3.4.1.2
- [2] Levič, V.G.: Úvod do statistické fyziky, ČSAV, Praha 1954
- [3] MIKULČÁK, Jiří. Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 978-807-1962-649; str. 219, 154

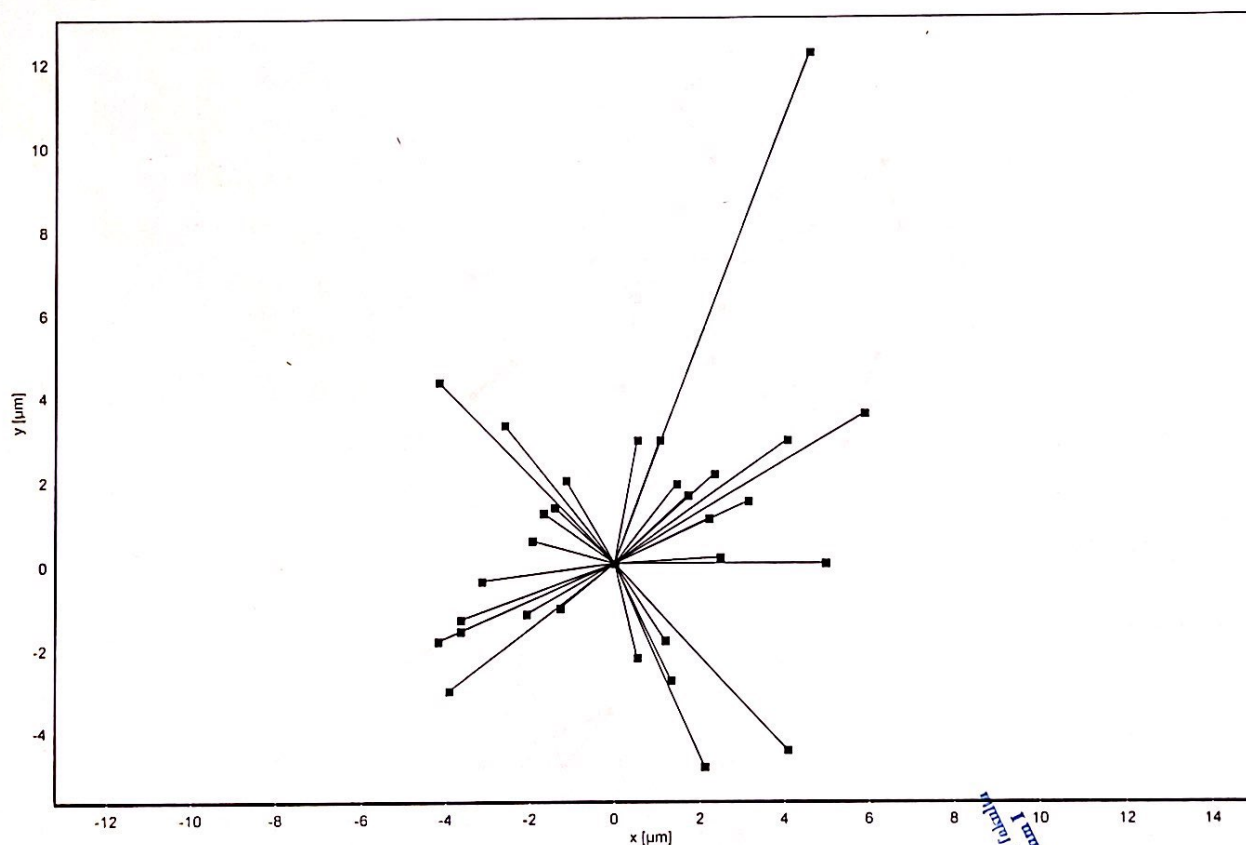
## Studium Brownova pohybu — rozložení vektorů posunutí

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 15:38:44  
Číslo/název měření: 1/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí: **1 : 2,06 (0,77) : 3,08 (1,08) : 3,98 (1,42)**  
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(19 \pm 6) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(40 \pm 10) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(60 \pm 12) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(77 \pm 16) \mu\text{m}^2$



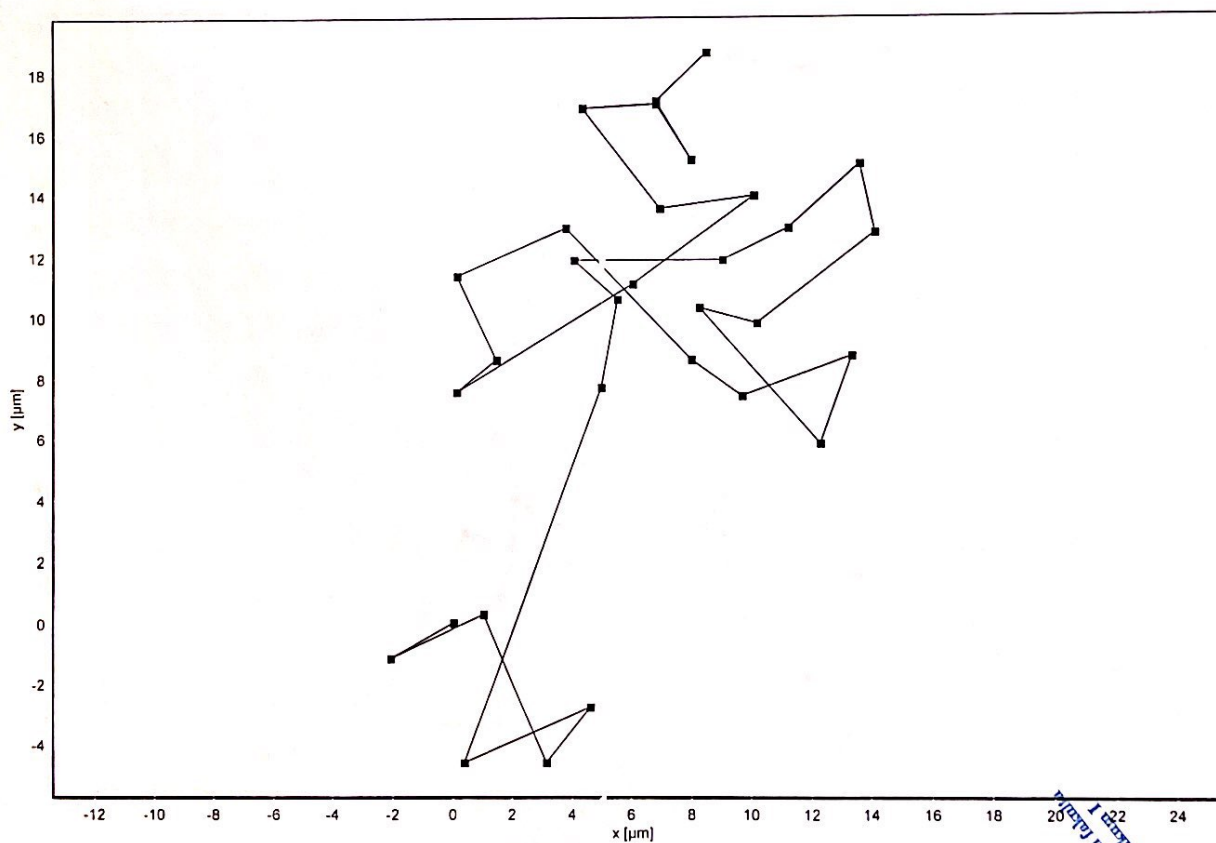
## Studium Brownova pohybu — trajektorie

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 15:38:44  
Číslo/název měření: 1/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí: **1 : 2,06 (0,77) : 3,08 (1,08) : 3,98 (1,42)**  
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(19 \pm 6) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(40 \pm 10) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(60 \pm 12) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(77 \pm 16) \mu\text{m}^2$





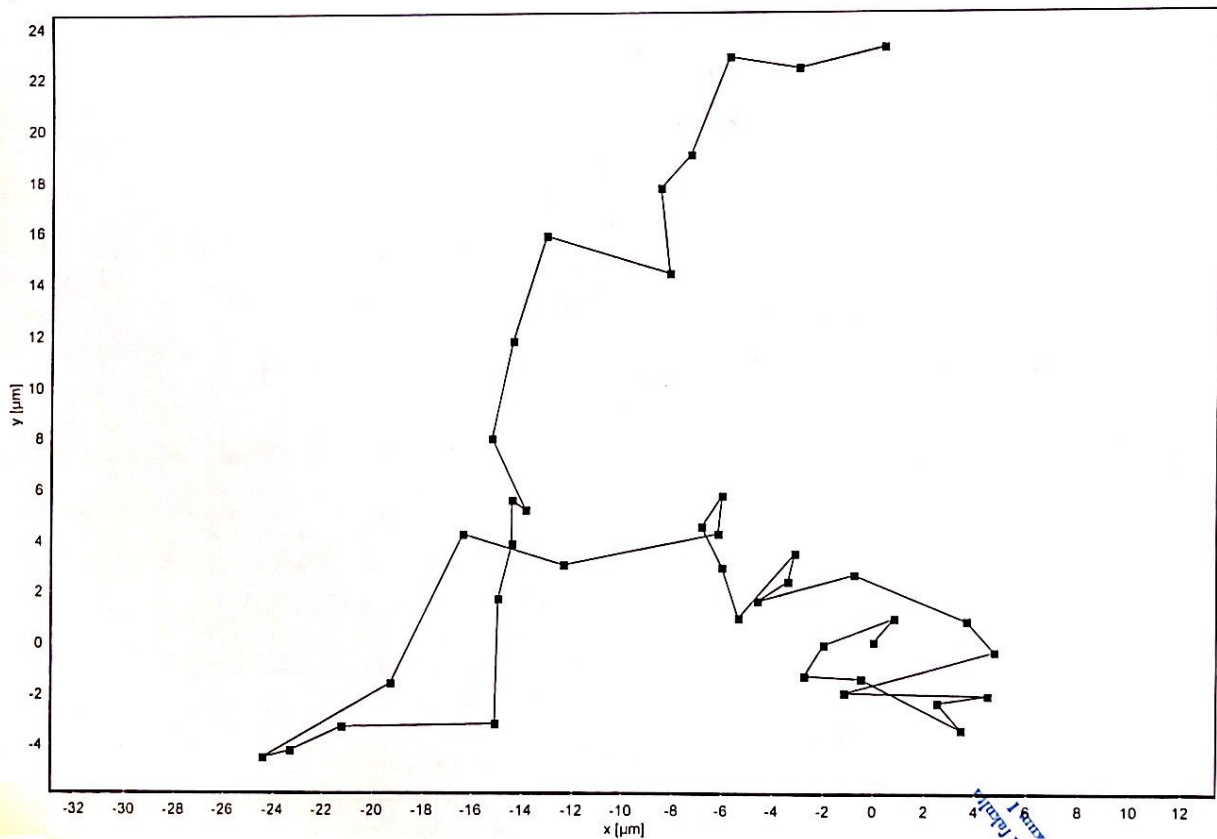
# Studium Brownova pohybu — trajektorie

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 15:47:03  
Číslo/název měření: 1/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí: **1 : 2,40 (0,54) : 4,15 (0,92) : 5,90 (1,36)**  
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	<b><math>(13 \pm 2) \mu\text{m}^2</math></b>
pro čas $2t$	<b><math>(31 \pm 5) \mu\text{m}^2</math></b>
pro čas $3t$	<b><math>(54 \pm 9) \mu\text{m}^2</math></b>
pro čas $4t$	<b><math>(77 \pm 13) \mu\text{m}^2</math></b>



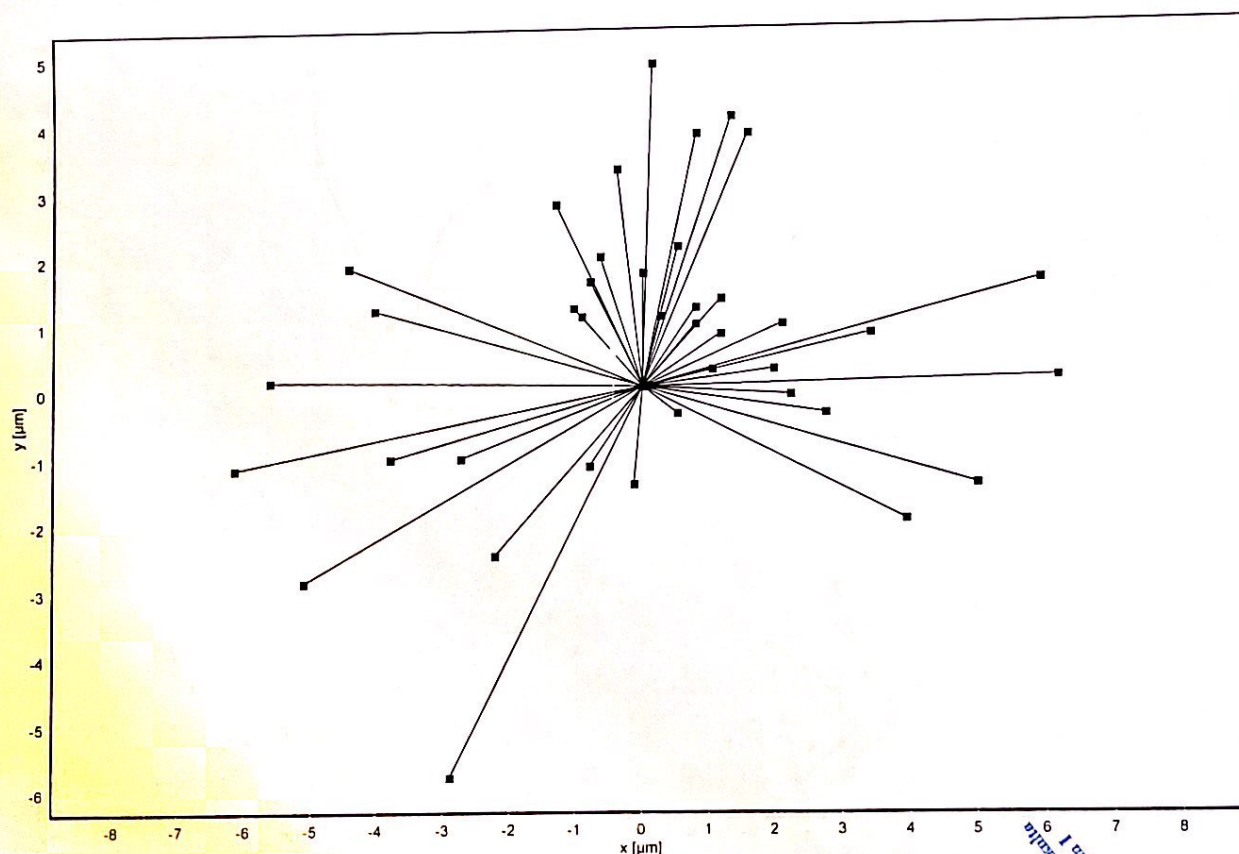
## Studium Brownova pohybu -- rozložení vektorů posunutí

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 15:47:03  
Číslo/název měření: 2/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí: **1 : 2,40 (0,54) : 4,15 (0,92) : 5,90 (1,36)**  
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(13 \pm 2) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(31 \pm 5) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(54 \pm 9) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(77 \pm 13) \mu\text{m}^2$



Manuál k fyzikálnímu měření  
Praktikum fyzika 1

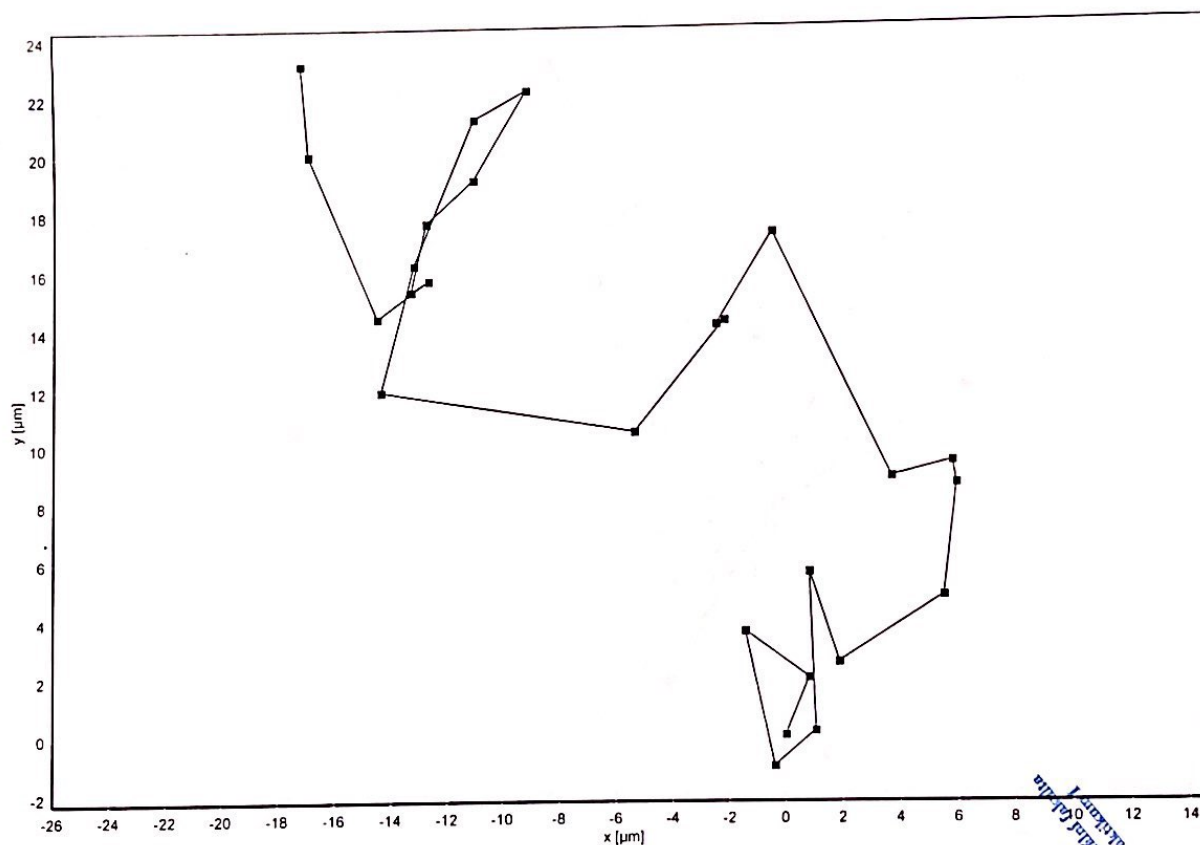
## Studium Brownova pohybu — trajektorie

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 15:57:34  
Číslo/název měření: 3/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí: 1 : 2,24 (0,71) : 3,14 (0,96) : 4,11 (1,24)  
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(18 \pm 5) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(41 \pm 8) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(57 \pm 10) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(75 \pm 13) \mu\text{m}^2$



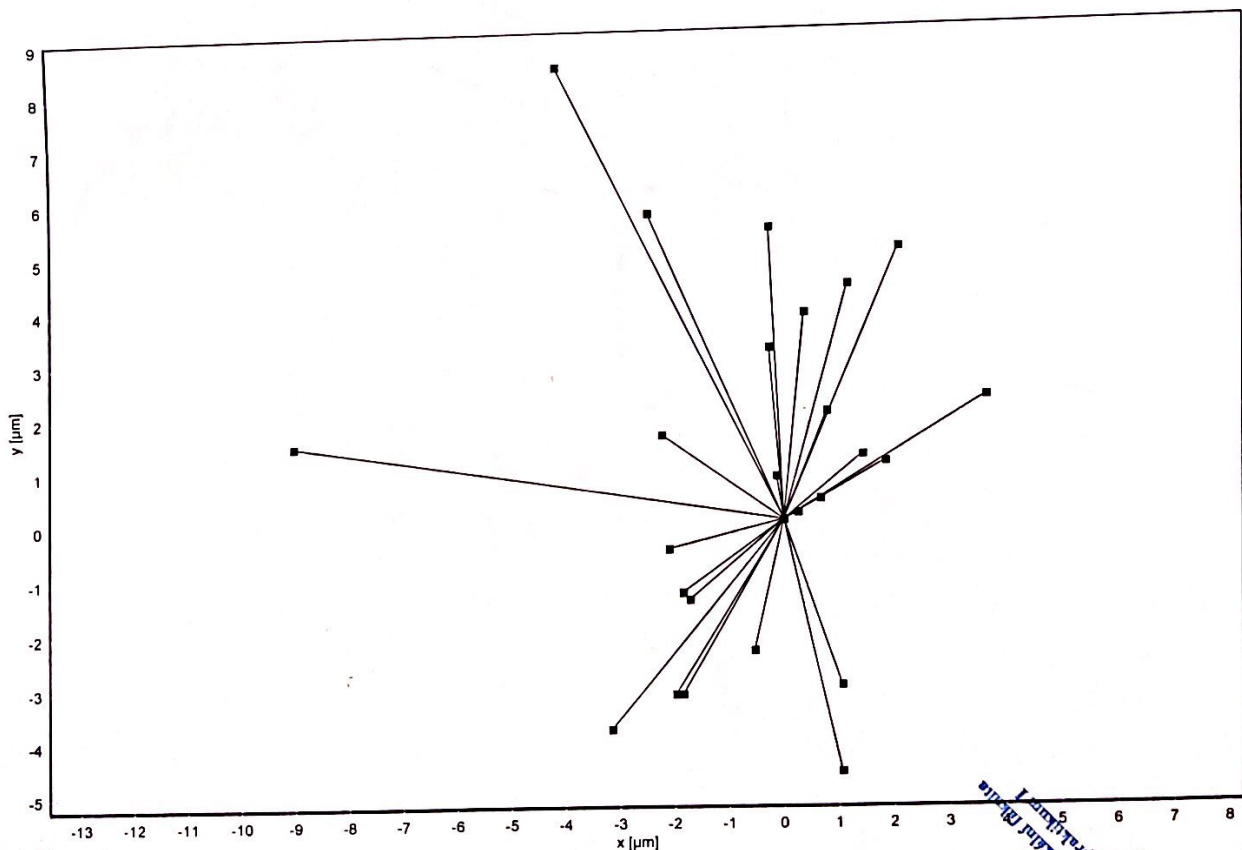
# Studium Brownova pohybu — rozložení vektorů posunutí

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 15:57:34  
Číslo/název měření: 3/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí: 1 : 2,24 (0,71) : 3,14 (0,96) : 4,11 (1,24)  
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(18 \pm 5) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(41 \pm 8) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(57 \pm 10) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(75 \pm 13) \mu\text{m}^2$



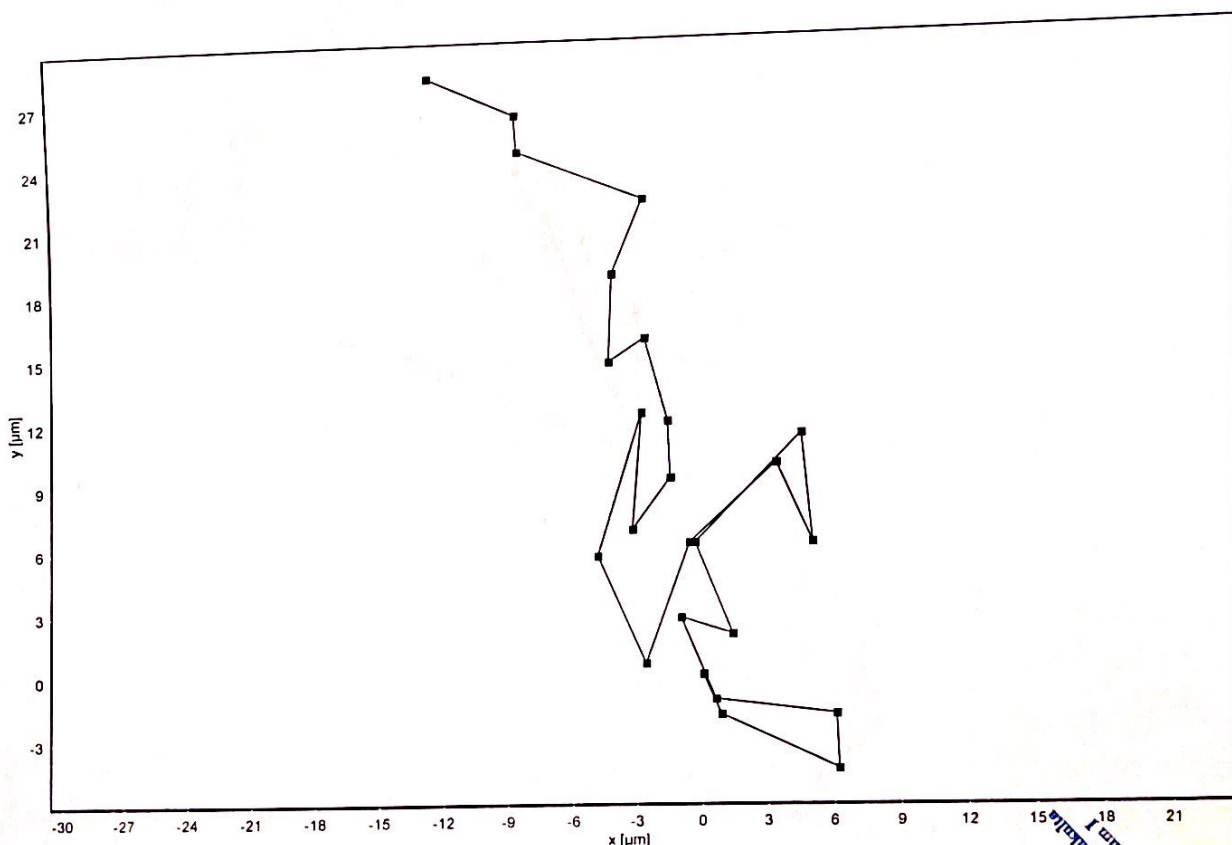
## Studium Brownova pohybu — trajektorie

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 16:05:10  
Číslo/název měření: 4/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí: **1 : 1,96 (0,43) : 2,71 (0,51) : 3,63 (0,74)**  
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(21 \pm 3) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(42 \pm 7) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(57 \pm 8) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(77 \pm 12) \mu\text{m}^2$



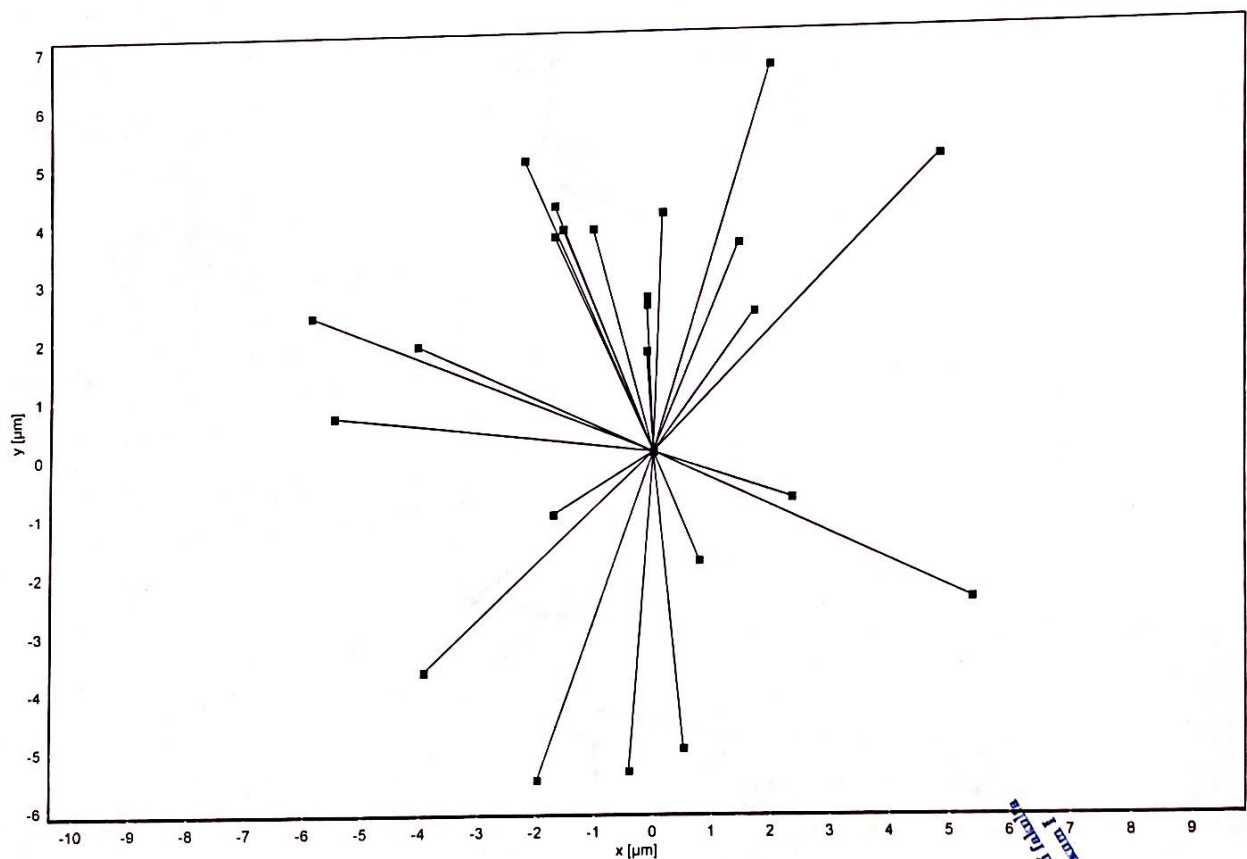
# Studium Brownova pohybu — rozložení vektorů posunutí

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 6:05:10  
Číslo/název měření: 4/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí:  $1 : 1,96 (0,43) : 2,71 (0,51) : 3,63 (0,74)$   
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(21 \pm 3) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(42 \pm 7) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(57 \pm 8) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(77 \pm 12) \mu\text{m}^2$



# Studium Brownova pohybu — trajektorie

Jméno a příjmení: Josef Kucera

Login: /student

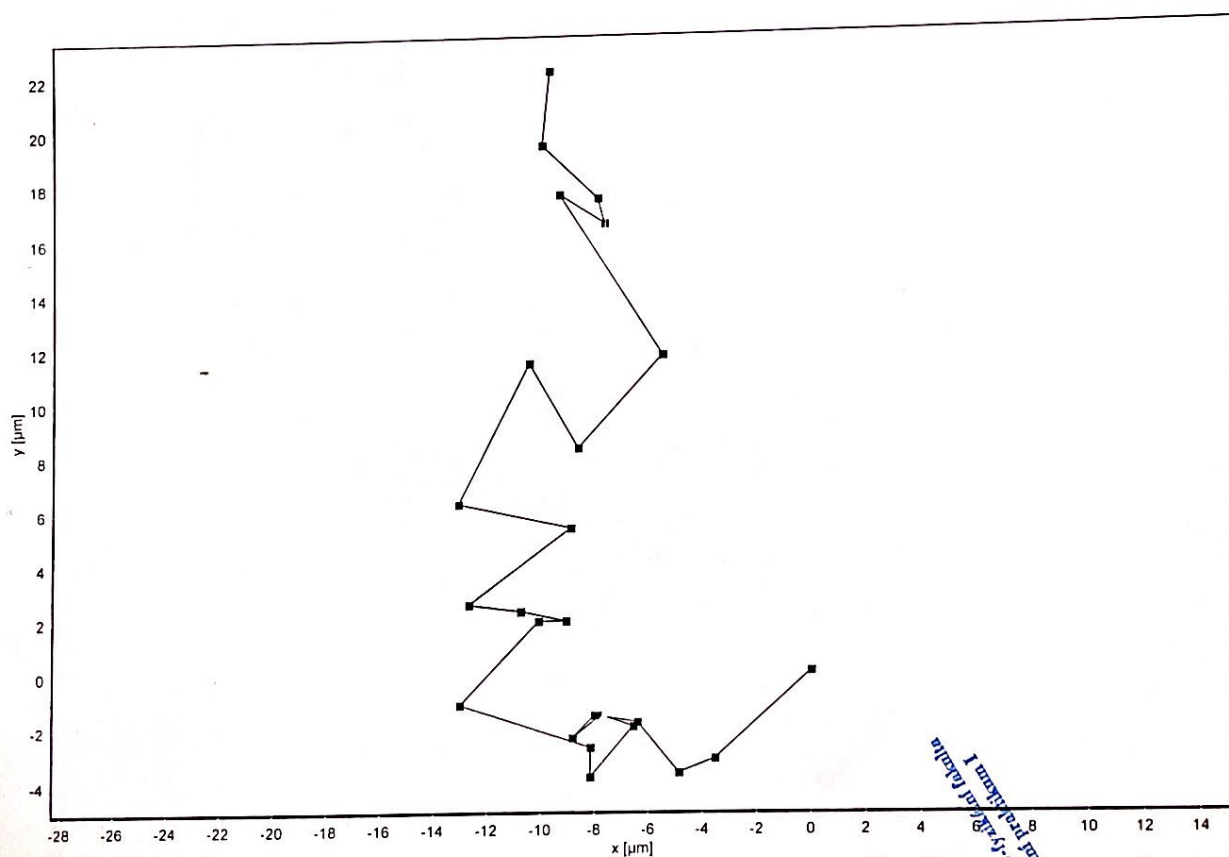
Datum a čas: 23.4.2019 16:09:13

Číslo/název měření: 5/ Iosephus Brown

Poměry středních kvadratických posunutí: 1 : 1,69 (0,51) : 2,43 (0,72) : 3,47 (1,02)  
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(11 \pm 3) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(19 \pm 4) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(28 \pm 5) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(40 \pm 8) \mu\text{m}^2$



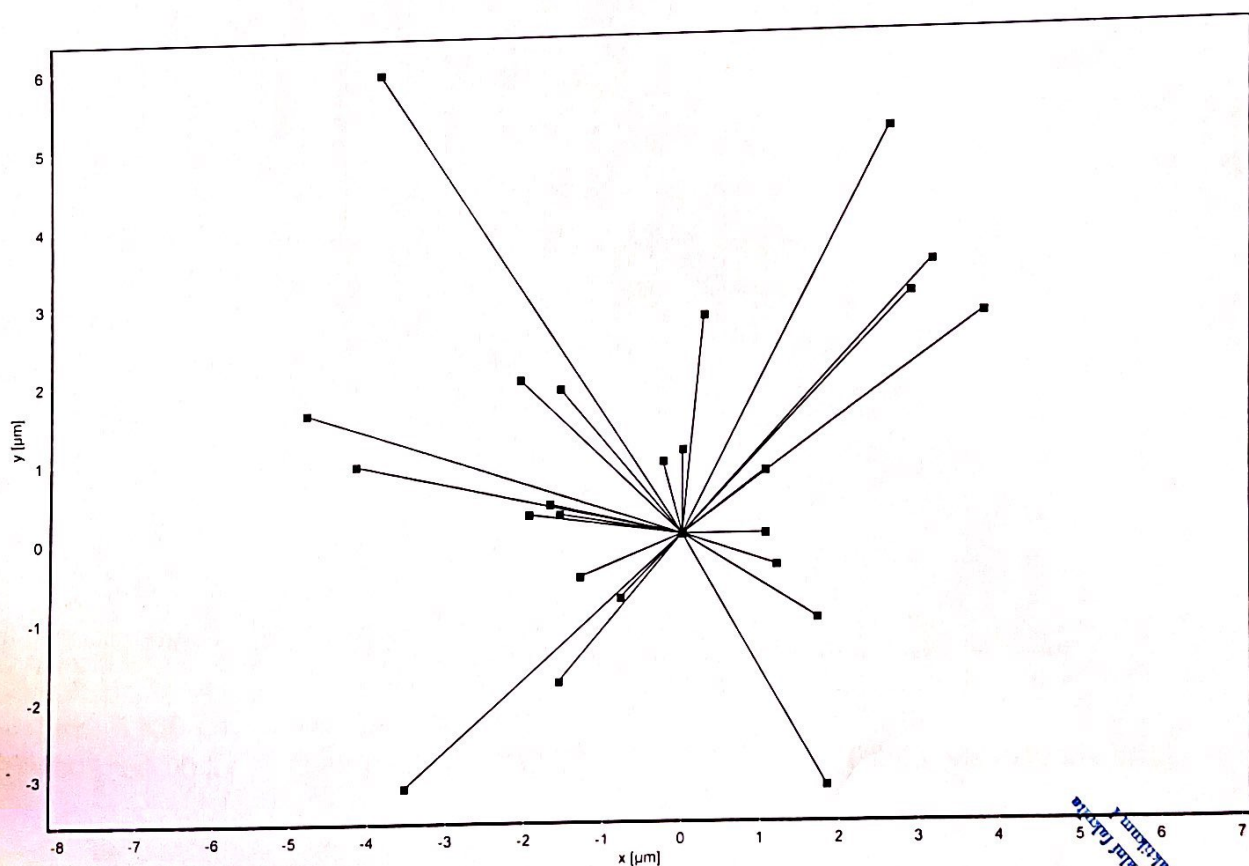
# Studium Brownova pohybu — rozložení vektorů posunutí

Jméno a příjmení: Josef Kucera  
Login: /student  
Datum a čas: 23.4.2019 16:09:13  
Číslo/název měření: 5/ Iosephus Brown

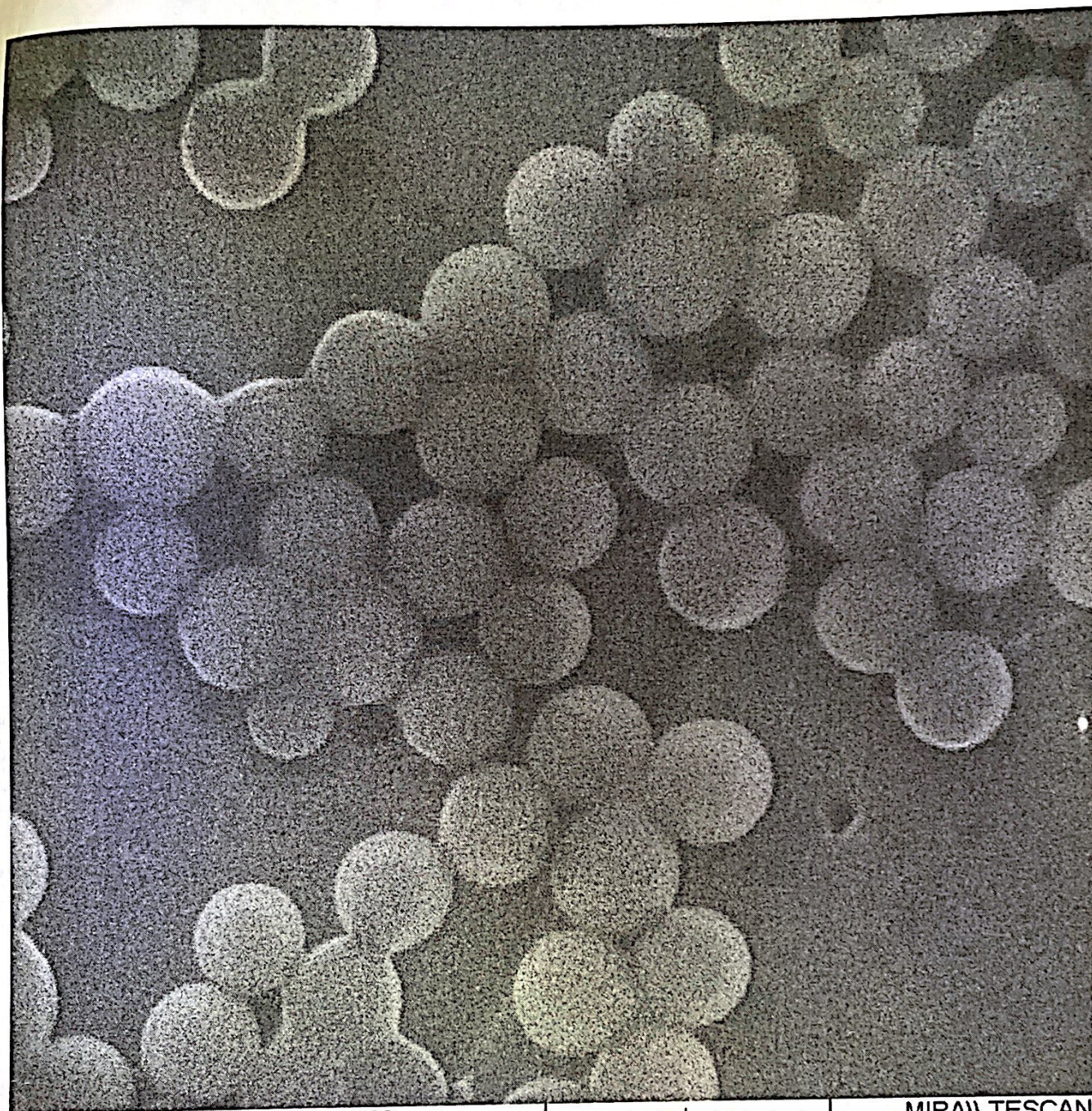
Poměry středních kvadratických posunutí:  $1 : 1,69 (0,51) : 2,43 (0,72) : 3,47 (1,02)$   
(V závorkách jsou std. odchylky průměrů.)

Střední kvadratická posunutí:

pro čas $t$	$(11 \pm 3) \mu\text{m}^2$
pro čas $2t$	$(19 \pm 4) \mu\text{m}^2$
pro čas $3t$	$(28 \pm 5) \mu\text{m}^2$
pro čas $4t$	$(40 \pm 8) \mu\text{m}^2$

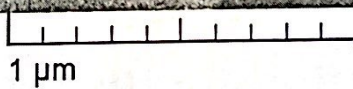






SEM HV: 15.00 kV  
View field: 3.830  $\mu\text{m}$   
SEM MAG: 60.00 kx

WD: 6.628 mm  
Det: SE Detector  
Date(m/d/y): 02/13/13



MIRAM TESCAN

Digital Microscopy Imaging

2019-04-04  
Materi: Sifat fisis  
Praktikum 1

3

ku-d