

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM ...

Úloha č.

Název:

Pracoval: stud. skup. dne

Odevzdal dne:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval: dne

Pracovní úkoly

1. Změřte voltampérovou charakteristiku vakuové diody (EZ 81) pomocí zapisovače 4106.
2. Změřte voltampérovou charakteristiku Zenerovy diody (KZ 703) pomocí převodníku UDAQ-1408E.
3. Pro Zenerovu diodu určete její dynamický vnitřní odpor v propustném směru při proudu 200 mA a v závěrném směru pro proud 400 mA.
4. Určete odpovídající Zenerovo napětí U_Z .
5. Zakreslete do V-A charakteristiky zatěžovací přímkou pro napětí zdroje $U_1 = -9$ V a proud $I = 400$ mA.
6. Sestavte stabilizátor napětí a ověřte jeho funkci.

1 Teoretická část

1.1 Vakuová dioda

Nejjednodušší elektronkou je vakuová dioda. Je tvořena baňkou, zpravidla válcovitého tvaru, ve které je umístěna anoda a katoda. Žhavicí vlákno diody v praxi často plní zároveň funkci katody, ze které se termoemisí uvolňují elektrony. Přiložením kladného potenciálu na anodu jsou elektrony k ní přitahovány a diodou prochází proud. Tento anodový proud I_a v propustném směru lze přibližně popsat vztahem

$$I_a = aU_a^{3/2}, \quad (1)$$

kde U_a je anodové napětí a a konstanta závislá na geometrickém uspořádání elektrod. Při obrácené polaritě vytváří elektrony kolem katody elektronový oblak, který část elektronů vrací zpět na katodu. K anodě projdou jen ty, jejichž rychlost je dostatečně velká k překonání potenciálové bariéry. Při nulovém napětí tak mezi vně vodivě spojenými elektrodami prochází nepatrný proud řádově asi 10^{-5} až 10^{-4} A. Při zvyšování záporného napětí anody vůči katodě tento proud rychle klesá, až je prakticky neměřitelný. Označujeme jako závěrný směr diody.

1.2 Polovodičové diody

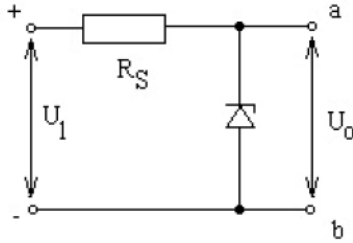
Princip polovodičových diod je založen na tzv. přechodu PN. Oblasti P a N diody jsou tvořeny polovodičovým materiálem (křemík) s vhodnými příměsemi tak, že v oblasti N je její vodivost způsobena nositeli záporného el. náboje, tedy elektrony, zatímco v oblasti P naopak nositeli kladného el. náboje, tzv. děrami. Spojením těchto dvou oblastí vznikne zmíněný PN přechod. Na jeho rozhraní se vytvoří spád potenciálu (hradlová vrstva), kde elektrické pole má směr od polovodiče typu N k typu P. Spojením části P se záporným pólem zdroje a N s kladným, se hradlová vrstva ještě zvětší a proud diodou prakticky neprochází, je zapojena v závěrném směru. Přehozením polarity naopak vnější pole hradlovou vrstvou vyruší, odpor polovodiče je malý, dioda je zapojena v propustném směru.

1.2.1 Zenerova dioda

Podstatou specifického typu pol. diod, Zenerovy diody, je elektrický průraz přechodu PN zapojeného v závěrném směru, při kterém ovšem nedochází k poškození PN přechodu (jako u klas. pol. diod), pokud procházející proud nepřesáhne jistou horní mez. K průrazu dochází vlivem tzv. Zenerova jevu v kombinaci s lavinovým násobením nositelů v oblasti přechodu.

Při Zenerově jevu se zvyšuje intenzita el. pole na přechodu PN s růstem závěrného napětí. Při určité kritické hodnotě této intenzity dochází k vytrhávání elektronů z valenčního pásu a ty se tak stávají vodivostními. Zvětšení počtu volných nositelů náboje je pak spojeno s klesajícím odporem součástky a narůstajícím proudem.

K Zenerovu jevu se ještě přidává tzv. lavinový efekt, kdy elektrony urychlené v el. poli dostatečné intenzity (menší než kritická hodnota intenzity pro Zenerův jev) získávají dostatečnou energii k uvolnění dalšího valenčního elektronu. To způsobí vytvoření párů elektron - díra, které mohou být znova urychleny a dát tak opětovně vzniknout dalším volným nosičům náboje.



Obr. 1: Náčrtek zapojení Zenerovy diody v obvodu stabilizátoru napětí.

Zenerovu diodu lze úspěšně použít v obvodu stabilizátoru napětí. V takovém případě se použije v zapojení podle náčrtku na obr. 1. Obvod plní funkci stabilizátoru, pokud je vstupní napětí U_1 větší než Zenerovo napětí U_z a pokud odpor R_S je zvolen tak, aby zatěžovací přímka protínala graf voltampérové charakteristiky v části, která odpovídá průrazu. Příslušný stabilizační činitel, který je dán jako poměr relativní změny vstupního napětí U_1 k relativní změně výstupního napětí U_0

$$S_u = \frac{U_0 \Delta U_1}{U_1 \Delta U_0}, \quad (2)$$

a udává nám vlastně jakost či kvalitu stabilizace, můžeme při dynamickém vnitřním odporu diody (I_0 procházející proud)

$$r_i = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0}, \quad (3)$$

a R_S velikosti odporu zapojeného v sérii, vyjádřit jako

$$S_u = \frac{U_0}{U_1} \frac{(R_S + r_i) \Delta I}{r_i \Delta I} = \frac{U_0 (R_S + r_i)}{U_1 r_i}. \quad (4)$$

Více pak k nalezení v např. [1], příp. o polovodičích jako takových [3].

1.3 Použití pomůcky

Souřadnicový zapisovač XY 4106 Zapisovač má dva nezávislé napěťové vstupy, podle velikosti napětí na nich se pero zapisovače pohybuje dvěma na sebe kolmými směry (podle osy x a y), v každém tak funguje jako voltmetr třídy přesnosti 0.2. Na vstup odpovídající ose x paralelně připojíme zkoumanou diodu, na odpovídající ose y pak předřazený odpor R , kterému je úměrný i procházející proud. Měřené hodnoty jsou vynášeny přímo na záznamový papír.

Převodník UDAQ-1408E Funguje prakticky na stejném principu jako souřadnicový zapisovač, akorát převodník neměří výstupní napětí plynule, nýbrž ve velmi krátkých časových intervalech. Vše je přes USB okamžitě zpracováváno počítačem, v našem případě k tomu přímo připraveným programem.

Digitální multimetr Dva byly použity při ověřování funkce stabilizátoru napětí. Při rozsahu 20 V nesou chybu: $\pm 0.1\% + 3$ digit.

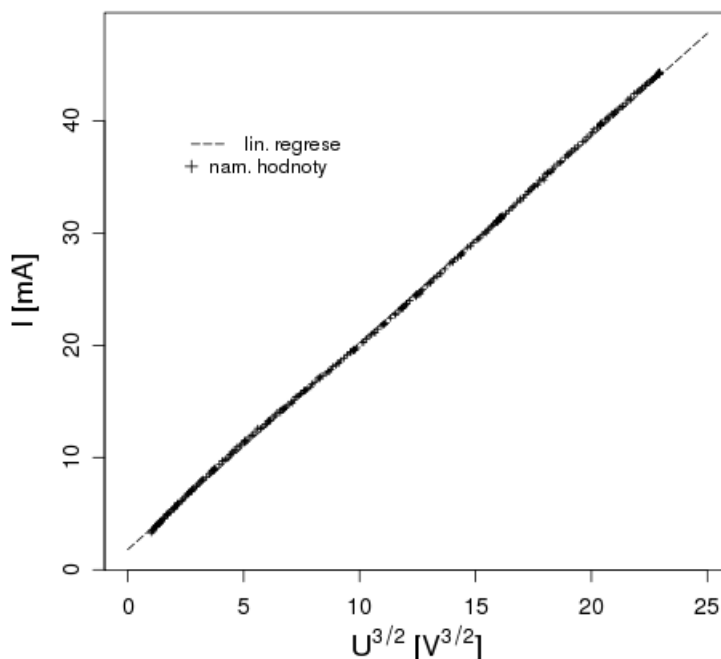
vakuová dioda EZ81, Zenerova dioda KZ 703, odporová dekáda, kabely, stabilizované zdroje napětí

2 Výsledky měření

2.1 Vakuová dioda EZ 81

Pro zpracování výsledků měření pomocí souřadnicového zapisovače bylo nutné poznamenat použitá rozlišení kvůli pozdějšímu vynášení a cejchování os. Měření v propustném směru proběhlo při rozlišení osy x 20×100 mV/cm = 2 V/cm a osy y 10×100 mV/cm = 1 V/cm. Při použitém odporu 10Ω to odpovídá proudu 0.1 A/cm. V závěrném směru pak x 200 mV/cm a y 1 mV/cm, tedy příslušný proud 0.1 mA/cm. Vzniklý graf voltampérové charakteristiky diody se nachází v příloze 2. Z něj je např. patrné, že proud procházející diodou při nulovém napětí je zhruba 0.66 mA. S uvážením chyby odečítání hodnot z grafu cca 0.01 mA tedy $I_0 = (0.66 \pm 0.01)$ mA.

VA char. vakuové diody v propust. směru



Obr. 2: Lineární regrese hodnot $U^{3/2}$ z VA charakteristiky vakuové diody EZ 81 v propustném směru.

Pro důkladnější analýzu vak. diody byla její VA char. měřena ještě pomocí převodníku UDAQ-1408E. Grafy hodnot jím naměřených najdete v přílohách 4 a 5. V propustném směru (příloha 4) byl diodě předžazen odpor 10Ω , v závěrném směru (příloha 5) pak 500Ω . Data, dále navíc zaznamenána v textových souborech, lze použít k ověření platnosti předpokládaného vztahu (1), případně přímo k určení koeficientu a . Ten zjistíme lineární regresí z hodnot proudu I a trochu upraveného napětí $U^{3/2}$, jak ukazuje graf na obr. 2. Ke zpracování byly vybrány body, pro které $U > 1$ V. Potom vychází

$$a = (1.846 \pm 0.002) \times 10^{-3} \text{ AV}^{-3/2},$$

a proud procházející při nulovém napětí, což je fyz. význam druhé konstanty z lin. rovnice (označme $b = I_0$), $b = (1.80 \pm 0.02)$ mA. Proud lze odečíst i přímo z grafu v příloze 5 (resp. datového souboru *D219.txt*), tam se pro napětí -0.2 V hodnota proudu pohybuje okolo 0.13 mA, pokud je trend obdobný tomu v příloze 2, odhaduji, že pro napětí 0 V je proud asi $I_0 = (0.43 \pm 0.05)$ mA. To je v souladu i s daty při měření prop. směru z *D218.txt*, kde okolo 0 V se hodnota proudu pohybovala v rozmezí 0.35 až 0.47 mA. Výsledný graf VA charakteristiky i s proloženou teoretickou závislostí je na obr. 3.

2.2 Zenerova dioda KZ 703

VA charakteristiku Zenerovy diody jsem nejprve (ilustračně) změřil stejně jako vakuovou diodu souřadnicovým zapisovačem (příloha 2), zařazený odpor 10Ω , rozlišení x 10×100 mV/cm, y 5×100 mV/cm, tedy 0.05 A/cm. Pro detailní popis pak opět převodníkem při použitím odporu 1Ω (viz. příloha 3 a postup dále).

Dynamický odpor diody r_{200} při procházejícím proudu 200 mA a r_{-400} při proudu 400 mA v průrazu určíme ze směrnice přímků lin. regrese (buď přímo $U = r_i I + U_{Z0}$, nebo $I \sim U$, pak musíme ještě dopočítat) pro blízké body v okolí žádaných, aby je ta co nejlépe reprezentovala, jak naznačuje (3). Konkrétní vybraná data ze záznamového souboru *D215.txt* jsou k nahlédnutí v příloze 1. Výsledky:

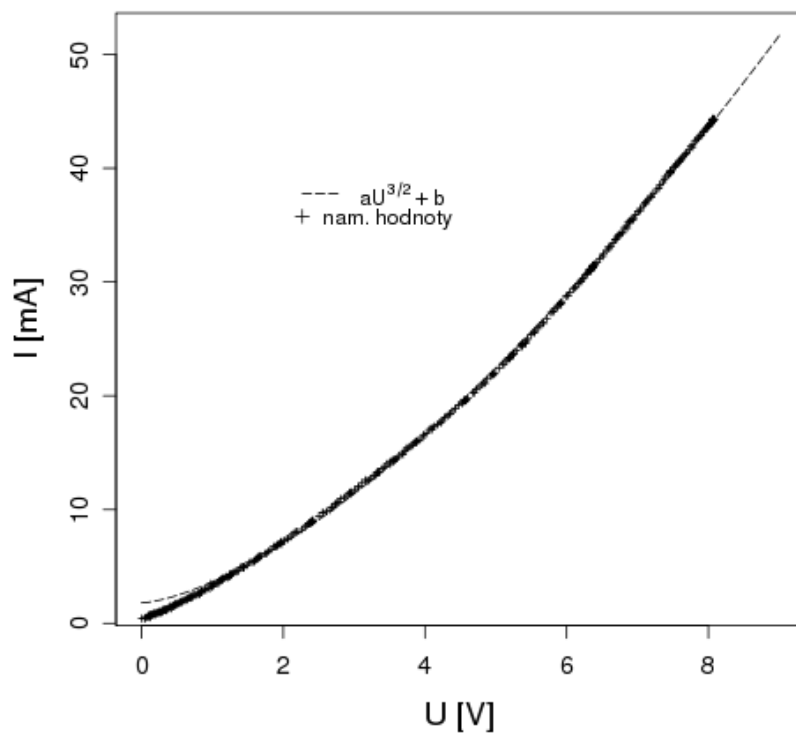
$$r_{200} = (0.17 \pm 0.01) \Omega, \quad r_{-400} = (0.10 \pm 0.01) \Omega.$$

Odpovídající Zenerovo napětí $U_Z = r_{-400} I + U_{Z0}$, kde U_{Z0} jsme získaly v té samé lin. regresi (konst. člen), je

$$U_Z = (-6.97 \pm 0.01) \text{ V}.$$

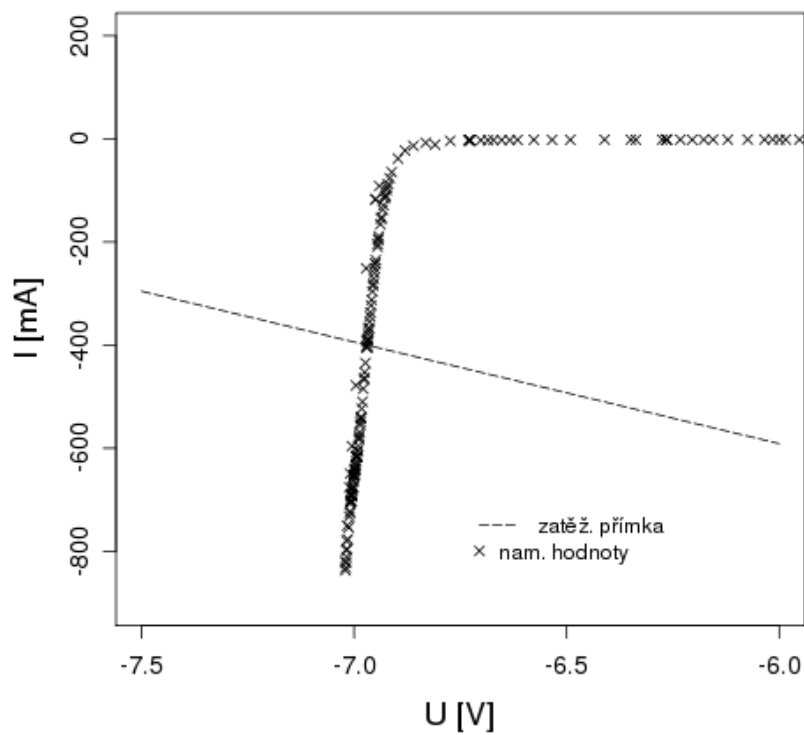
Nakonec do grafů zakreslíme odpovídající zatěžovací přímkou pro napětí zdroje -9 V a proud 400 mA (v průrazu), stačí dopočítat R z $I = \frac{U - U_Z}{R}$, obr. 4, příloha 2 (k sestrojení přímkou ale použity hodnoty získané převodníkem) a příloha 3.

VA charakteristika vakuové diody v propust. směru



Obr. 3: VA charakteristika vakuové diody EZ 81 v propust. směru.

V-A charakteristika KZ 703 v závěrném směru a průrazu



Obr. 4: Graf VA charakteristiky Zenerovy diody s částí závěrného směru a průrazu.

2.3 Stabilizátor napětí

U_1 [V]	9.00	9.25	9.52	9.76	10.01	10.26	10.50	10.75	11.00	11.26	11.50	11.75	12.00
U_0 [V]	7.055	7.069	7.090	7.104	7.128	7.152	7.168	7.183	7.199	7.213	7.232	7.246	7.260

Tabulka 1: Měřené napětí zdroje U_1 a na diodě U_0 . Při dodržování konvence vůči diodě by samozřejmě hodnoty měly být záporné, neboť se jedná o její průraz. Toto jsou pak jejich absolutní hodnoty.

Funkci stabilizátoru napětí ilustruje tabulka 1. Mohu ještě spočítat odpovídající stabilizační činitel S_u pro napětí zdroje -9 V podle (4) jako

$$S_u = (40 \pm 4).$$

3 Diskuse výsledků

Naměřené VA charakteristiky diod potvrzují teoretické předpoklady. Proud protékající vakuovou diodou vymizí až po dosažení určitého závěrného napětí, naopak při použití Zenerovy diody začne proud procházet v propustném směru při dostatečném napětí k překonání hradlové vrstvy. V závěrném směru je pak krásně patrná oblast průrazu (obr. 4, příloha 2 a 3).

Všechny chyby vnesené měřicími přístroji jsou velice malé či zanedbatelné (největší rel. chyba přímo měřených veličin okolo 2 % při měření dig. voltmetry v obvodu stabilizátoru). Větší vliv (vyjma zmíněných voltmetrů) na výsledky mají chyby statistické z určování nepřímo měřených veličin (r_i , a , b , U_{Z0}) lineární regresí a z nich pak dalších spočtených (U_Z , S_u). I tyto jsou však relativně malé a většina z nich byla trochu nadhodnocena.

K určení konstanty a v třípolovinovém zákonu (1) byly použity hodnoty naměřené pouze pro $U > 1$ V, jak je zmíněno výše, neboť hodnoty v okolí 0 V, po umocnění na $3/2$, silně neodpovídají předpokládané linearitě. I z tohoto důvodu velikost proudu procházející diodou při nulovém napětí tímto způsobem zpracování vyšla vyšší než předpokládaná (řádově 10^{-4} A), tedy $b = I_0 = (1.80 \pm 0.02)$ mA. Vztah (1) pro napětí okolo 0 V, ale $\neq 0$ V, proto neplatí dokonale, dobře však ilustruje závislost pro napětí vyšší, jak je patrné na obr. 3.

Hodnota klidového proudu určená z grafu souřadnicového zapisovače (0.66 ± 0.01 mA) odpovídá lépe. Na druhou stranu, ačkoli je souř. zapisovač hodně přesný, nemůžeme se při měření vyvarovat chyb lidského faktoru. Např. milimetrový papír byl při vložení lehce nakloněn z vodorovného směru (tedy směry os na mil. papíře jsou nepatrně otočeny vůči osám zapisovače, čemuž předejdeme alespoň zdánlivým srovnáním papíru s okraji záznamové plochy), papír nebyl řádně upevněn a pohybem pera se nepatrně smýká (to bylo pozorováno při měření charakteristiky Zenerovy diody, proto spodní křivka není platná, viz. příloha 2), papír na své celé ploše není úplně napnutý atp. Proto je dle mého názoru nejvěrohodnější velikost procházejícího proudu ta získaná přímo z grafu hodnot naměřených převodníkem (příloha 5 či 4), tedy $I_0 = (0.43 \pm 0.05)$ mA, ačkoli byla stanovena spíše odhadem (s dostatečně nadhodnocenou chybou), ovšem není zatížena většími systematickými chybami.

Pro určování dyn. odporů Zenerovy diody KZ 703 by bylo asi vhodnější proložit dané části VA charakteristiky jinou než lineární závislostí, protože ta naměřená se sice dobře blíží, ale zcela lineární není. Z toho důvodu byla lineární regrese provedena pouze pro data z většího okolí daných proudů 200 a -400 mA. Zároveň velikost vnitřního dyn. odporu je jistě závislá na teplotě diody, která se během měření může měnit (zvláště pokud je po celou dobu připojena k napětí).

4 Závěr

Souřadnicovým zapisovačem i převodníkem UDAQ-1408E byly změřeny voltampérové charakteristiky vakuové diody EZ 81 (obr. 2, příloha 2, příloha 4 a 5) a Zenerovy diody KZ 703 (příloha 2 a 3) v propustných i závěrných směrech (resp. průrazu).

Z VA charakteristiky EZ 81 byla ověřena platnost vztahu (1) (třípol. zákona), detailnější analýza viz. část 2.1.

Z VA charakteristiky Zenerovy diody byl určen její dynamický odpor při procházejícím proudu 200 mA

$$r_{200} = (0.17 \pm 0.01) \Omega,$$

a dyn. odpor při proudu 400 mA v závěrném směru (data v příloze 1)

$$r_{-400} = (0.10 \pm 0.01) \Omega.$$

Pomocí r_{-400} jsme našli hodnotu odpovídajícího Zenerova napětí při proudu 400 mA v závěrném směru

$$U_Z = (-6.97 \pm 0.01) \text{ V}$$

a do grafů zakreslili odpovídající zatěžovací přímkou pro napětí zdroje $U_1 = -9 \text{ V}$ a proud $I = 400 \text{ mA}$, viz. obr. 4, příloha 2 a 3.

Nakonec jsme ověřili funkci stabilizátoru napětí obvodu (tab. 1) a spočetli jeho stabilizační činitel při napětí zdroje $U_1 = -9 \text{ V}$

$$S_u = 40 \pm 4.$$

Grafy byly sestrojeny a výsledky zpracovány pomocí programu *R 2.10.1*.

Použitá literatura

- [1] Bakule R., Šternberk J.: Fyzikální praktikum II, SPN, Praha 1989
- [2] Englich J.: Zpracování výsledků fyzikálních měření, 1999, <http://physics.mff.cuni.cz/to.en/vyuka/zfp>
- [3] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M.: Feynmanovy přednášky z fyziky 3, FRAGMENT, Havlíčkův Brod 2002

5 Přílohy

Příloha 1 - Data ze souboru D215.txt pro určení dyn. odporu KZ 703

Závěrný směr		Propustný směr	
U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
-6.9851	-549.6472		
-6.9843	-542.6788		
-6.9839	-542.9333		
-6.9835	-539.5251	0.6893	101.5222
-6.9820	-523.3258	0.6941	117.5177
-6.9804	-510.0757	0.6986	133.4894
-6.9785	-484.7717	0.7015	146.1542
-6.9766	-467.3511	0.7045	159.5557
-6.9762	-463.6890	0.7048	150.4004
-6.9752	-452.7789	0.7081	178.1714
-6.9732	-434.6722	0.7107	191.8280
-6.9716	-251.0577	0.7125	203.7048
-6.9704	-403.4930	0.7143	213.0890
-6.9699	-403.4680	0.7144	213.1903
-6.9698	-403.7732	0.7145	212.8351
-6.9695	-403.9508	0.7148	216.5735
-6.9693	-402.6288	0.7150	190.0733
-6.9692	-396.3727	0.7160	195.2875
-6.9691	-390.7269	0.7163	198.9496
-6.9690	-391.1847	0.7172	232.7216
-6.9690	-390.6506	0.7185	209.4519
-6.9676	-388.2599	0.7200	251.1084
-6.9669	-379.4604	0.7214	260.8240
-6.9660	-373.1030	0.7216	262.9340
-6.9651	-367.1265	0.7216	262.9602
-6.9650	-366.9232	0.7218	263.1128
-6.9637	-355.0464	0.7219	262.0184
-6.9625	-344.6198	0.7229	272.3944
-6.9616	-336.6089	0.7230	271.5302
-6.9600	-323.0542	0.7240	281.3208
-6.9588	-312.3981	0.7275	308.5577
-6.9568	-296.0712	0.7293	286.8140
-6.9555	-284.7290		
-6.9547	-280.7111		
-6.9537	-271.0980		
-6.9523	-260.0861		