



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## Esperienza 5: STUDIO DELLA POLARIZZAZIONE MEDIANTE LAMINE DI RITARDO

G. Galbato Muscio

F. Ghimenti

L. Gravina

L. Graziotto

30 Maggio 2019

GRUPPO D1-1

### Abstract

Si studia il funzionamento delle lamine di ritardo  $\lambda/2$  e  $\lambda/4$ . Dopo averne determinato l'asse ottico, le si utilizza per realizzare un polarimetro. Mediante il polarimetro si misura quindi la polarizzazione della luce emessa dal laser He-Ne, sia direttamente, sia facendola passare per un beam-splitter polarizzatore o per un filtro polaroid.

## Indice

<b>1</b>	<b>Apparato strumentale</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Taratura del polarimetro</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Controllo di funzionamento del polarimetro</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Misura della polarizzazione della luce emessa dal laser He-Ne</b>	<b>4</b>
4.1	Misura dei parametri di Stokes per luce uscente dal beam splitter . . . . .	4
4.2	Misura dei parametri di Stokes per luce emessa dal laser . . . . .	5
4.3	Misura dei parametri di Stokes per luce polarizzata linearmente con un polaroid . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Appendice</b>	<b>7</b>

## 1 Apparato strumentale

Si utilizza un laser He-Ne di lunghezza d'onda, dichiarata dal costruttore,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , montato su tavolo ottico.

In serie al laser è posta un'iride, allo scopo di evitare l'ingresso nel laser dei fasci di ritorno, che ne perturberebbero il comportamento. Due specchi orientati a  $45^\circ$  portano il fascio ad incidere su un primo beam-splitter polarizzatore, seguito dalle due lamine di ritardo  $\lambda/2$  e  $\lambda/4$  e dal secondo beam-splitter polarizzatore. Successivamente, è posto il fotodiodo, utilizzato per misurare l'intensità del fascio.

La configurazione utilizzata è illustrata in Figura 1; essa varierà nel corso dell'esperienza, e si farà riferimento a questa figura per indicare quali elementi vengano rimossi o spostati.

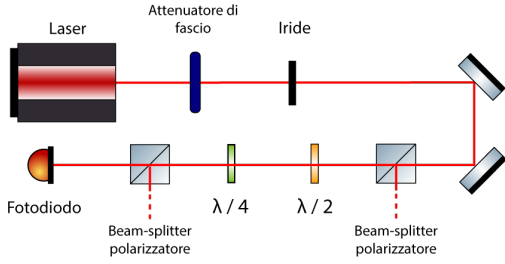


Figura 1: Configurazione utilizzata.

Il segnale in uscita dal fotodiodo è inviato al multimetro METEX M-4650. Le misure di intensità luminosa vengono riportate come differenza di potenziale misurata ai capi del fotodiodo, pertanto è da intendere la presenza di un fattore di proporzionalità non noto. Inoltre, si regola con un filtro attenuatore l'intensità della luce emessa dal laser in modo da restare all'interno della regione di linearità del fotodiodo, ossia al di sotto di 10 V. L'incertezza associata alle misure di intensità luminosa sarà fornita a seconda della cifra meno significativa riportata dallo strumento, e dipenderà dalla intensità stessa.

## 2 Taratura del polarimetro

In questa sezione si rimuove la lamina  $\lambda/4$ . Si utilizza il primo beam splitter polarizzatore per ottenere una luce polarizzata orizzontalmente (linearmente, in un piano parallelo al piano del tavolo ottico), questa viene fatta passare attraverso una lamina di ritardo  $\lambda/2$  montata su una ghiera graduata che permette di controllarne la rotazione; il fascio in uscita dalla lamina viene fatto passare nel secondo beam splitter che ne seleziona la sola componente orizzontale, infine l'intensità di questo fascio viene misurata con il fotodiodo. Prima di compiere le misure si verifica il corretto allineamento dei fasci.

Si vuole trovare l'angolo  $\theta_0$  della ghiera che corrisponde ad una situazione in cui l'asse principale della  $\lambda/2$  è orizzontale.

In Figura 2 è riportato l'andamento dell'intensità misurata al variare dell'angolo di rotazione della  $\lambda/2$ , mentre le misure sono riportate in Tabella 2, in Appendice. Ai punti sperimentali è sovrapposto un fit dell'andamento teorico dato da

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(2(\theta - \theta_0)) \quad (1)$$

dove i parametri che meglio descrivono le misure sono  $I_0 = (4.48 \pm 0.05) \text{ V}$  e  $\theta_0 = (0.680 \pm 0.005) \text{ rad}$ .

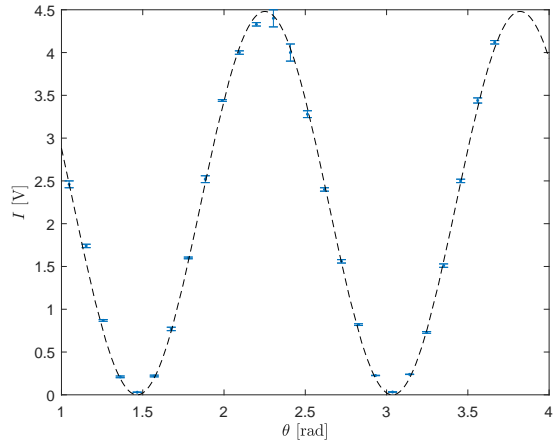


Figura 2: Andamento della tensione misurata dal fotodiodo al variare dell'angolo di rotazione della lamina  $\lambda/2$ , ai dati è sovrapposto il fit del modello teorico

Valutato l'angolo  $\theta_0$  corrispondente all'asse principale della  $\lambda/2$ , si prosegue a valutare lo

stesso angolo  $\xi_0$  per la  $\lambda/4$ : quest'ultima viene montata tra il primo beam splitter e la  $\lambda/2$ , come da Figura 1. Avendo posizionato la seconda lamina di ritardo nella configurazione per cui l'asse è orizzontale (ossia all'angolo  $\theta_0$  misurato precedentemente), si ruota la ghiera della  $\lambda/4$  e si ottengono le misure riportate in Tabella 3, in Appendice, e in Figura 3; in quest'ultima è anche riportato il fit del modello teorico dato da

$$I(\xi) = \frac{\tilde{I}_0}{2} \left( 1 - \cos^2(2(\xi - \xi_0)) \right) \quad (2)$$

dove i parametri del fit che meglio descrivono le misure sono  $\tilde{I}_0 = (7.6 \pm 0.1) \text{ V}$  e  $\xi_0 = (0.19 \pm 0.02) \text{ rad}$ .

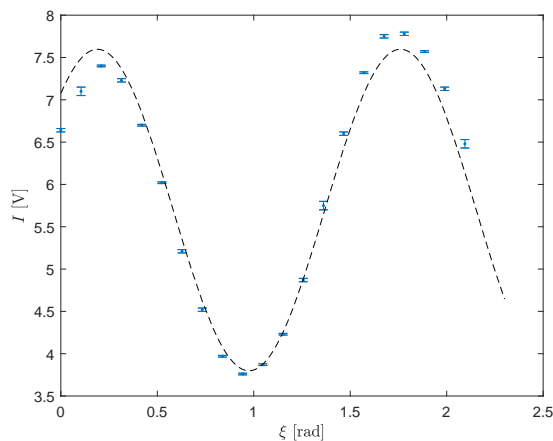


Figura 3: Andamento della tensione misurata dal fotodiodo al variare dell'angolo di rotazione della lamina  $\lambda/4$ , ai dati è sovrapposto il fit del modello teorico

Il motivo per cui si è scritto  $\tilde{I}_0$  invece di  $I_0$  è che nel caso ideale queste due quantità dovrebbero coincidere, ma nel corso dell'esperienza tra la taratura di  $\lambda/2$  e quella di  $\lambda/4$  sono state effettuate delle importanti operazioni di allineamento del sistema, che hanno comportato anche una modifica dell'intensità massima del fascio.

Infine, si osserva che il fit relativo alla taratura della  $\lambda/4$  si discosta maggiormente dai punti sperimentali rispetto a quello della  $\lambda/2$ ; in particolare, si confronta un coefficiente  $R^2 = 0.998$  per la  $\lambda/2$  con  $R^2 = 0.976$  per la  $\lambda/4$ . Si suppone che questo sia dovuto al fatto che

la  $\lambda/4$  è molto più sensibile a imprecisioni nell'allineamento rispetto alla  $\lambda/2$ .

### 3 Controllo di funzionamento del polarimetro

Si verifica il corretto allineamento delle lamine ritardanti nel modo seguente: la lamina  $\lambda/4$  viene tenuta fissa ad un angolo pari a  $\xi_0 + 45^\circ$  mentre si varia l'angolo  $\theta$  della lamina  $\lambda/2$ . La posizione di partenza è quella in cui le due lamine hanno gli assi ottici sfasati di  $45^\circ$ . Si misura l'intensità della luce all'uscita del secondo beam-splitter polarizzatore. I risultati sono riportati nella figura 4 e nella tabella 4. In questa configurazione si prevede che l'intensità misurata in funzione di  $\theta$  sia costante, e ridotta di un fattore  $r^2(\lambda/2)$  (rispettivamente,  $r^2(\lambda/4)$ ) rispetto ai massimi misurati nella sezione precedente. Ciò è dovuto all'introduzione di un'ulteriore lamina rispetto alle configurazioni utilizzate nella sezione 2. L'andamento sinusoidale osservato in figura 4 è dovuto a imperfezioni nelle lamine che attenuano l'intensità della luce in maniera non omogenea rispetto alla direzione di polarizzazione. L'intensità media risulta essere

$$\bar{I} = (3.844 \pm 0.001) \text{ V}$$

Confrontando con i massimi della sezione 2 troviamo

$$r^2(\lambda/2) = \frac{\bar{I}}{\tilde{I}_0} = 0.506 \pm 0.007$$

$$r^2(\lambda/4) = \frac{\bar{I}}{I_0} = 0.86 \pm 0.01$$

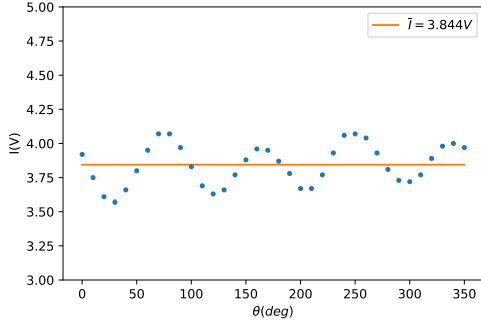


Figura 4: Intensità misurata tenendo la lamina  $\lambda/4$  fissa a  $\xi + 45^\circ$  e facendo variare l'angolo  $\theta$  della lamina  $\lambda/2$

## 4 Misura della polarizzazione della luce emessa dal laser He-Ne

In questa sezione si utilizza l'intera configurazione di Figura 1, tenuto conto che gli assi ottici delle lamine di ritardo  $\lambda/2$  e  $\lambda/4$  sono quelli misurati nella Sezione 2, ovvero

$$\theta_0 = (0.680 \pm 0.005) \text{ rad} = (39.0 \pm 0.3)^\circ$$

$$\xi_0 = (0.19 \pm 0.02) \text{ rad} = (11.0 \pm 1.1)^\circ;$$

si ricorda che l'incertezza sulla ghiera goniometrica che permette la rotazione delle lamine è di 1 grado. Gli angoli di orientazione delle lamine necessari a misurare i diversi parametri di Stokes sono riferiti, nel seguito, alla posizione angolare dell'asse ottico.

I parametri di Stokes normalizzati sono

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{I_1 - I'_1}{I_1 + I'_1} \\ s_2 &= \frac{I_2 - I'_2}{I_2 + I'_2} \\ s_3 &= \frac{I_3 - I'_3}{I_3 + I'_3}, \end{aligned}$$

essi sono compresi tra 0 e 1, e si riferiscono, rispettivamente, alla polarizzazione lineare orizzontale e verticale, lineare a  $45^\circ$  e  $-45^\circ$  e circolare left e right. La misura di  $I_i$  è compiuta ruotando le lamine di ritardo agli angoli riportati in Tabella 1.

Tabella 1: Orientazione delle lamine per la misura dei parametri di Stokes

	$\lambda/4: \xi - \xi_0$	$\lambda/2: \theta - \theta_0$
$I_1$	$0^\circ$	$0^\circ$
$I'_1$	$0^\circ$	$45^\circ$
$I_2$	$45^\circ$	$22.5^\circ$
$I'_2$	$45^\circ$	$-22.5^\circ$
$I_3$	$0^\circ$	$22.5^\circ$
$I'_3$	$90^\circ$	$22.5^\circ$

Si osserva che con la normalizzazione sopra riportata si possono trascurare effetti di instabilità del laser o di deriva della intensità del fondo, nonché delle perdite per assorbimento per i vari componenti.

### 4.1 Misura dei parametri di Stokes per luce uscente dal beam splitter

Si misura la polarizzazione della luce emessa dal laser He-Ne dopo che essa ha attraversato il primo beam-splitter polarizzatore, lasciando invariata dunque la configurazione del sistema. Si riportano in Tabella 5, in Appendice, i dati sperimentali; si ottengono per i parametri di Stokes i seguenti valori:

$$s_1 = 0.974 \pm 0.003$$

$$s_2 = 0.072 \pm 0.003$$

$$s_3 = 0.017 \pm 0.003;$$

si ha il grado di polarizzazione  $s^2 = (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)^{1/2} = 0.977 \pm 0.003$ , prossimo a 1, come ci si aspetterebbe per luce completamente polarizzata. Si osserva che il parametro relativo alla polarizzazione lineare orizzontale risulta di un ordine di grandezza superiore a  $s_2$  e  $s_3$ , in accordo con l'assunzione iniziale che il beam splitter polarizzatore lasci passare unicamente la polarizzazione orizzontale. La discrepanza rispetto al valore di 1 per  $s_1$  e di 0 per gli altri parametri è da attribuire ad effetti di assorbimento, al non perfetto allineamento dei fasci e alla non completa planarità delle superfici delle lamine.

## 4.2 Misura dei parametri di Stokes per luce emessa dal laser

Si rimuove il primo beam splitter polarizzatore, e lo si pone dopo il secondo polarizzatore, per migliorare la selezione della polarizzazione in uscita dal polarimetro. In questo modo, sul polarimetro (ovvero sulla prima lamina di ritardo  $\lambda/2$ ) incide direttamente la luce emessa dal laser He-Ne, di cui si può pertanto dare una stima della polarizzazione. Si riportano in Tabella 6, in Appendice, i dati sperimentali; i parametri di Stokes sono i seguenti:

$$\begin{aligned}s_1 &= 0.65 \pm 0.01 \\ s_2 &= -0.755 \pm 0.001 \\ s_3 &= 0.037 \pm 0.009;\end{aligned}$$

si ha il grado di polarizzazione  $s^2 = (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)^{1/2} = 0.998 \pm 0.008$ , compatibile con 1, valore che indica la completa polarizzazione. Pertanto si inferisce che la luce del laser He-Ne sia totalmente polarizzata e, dall'osservazione del fatto che il parametro di Stokes relativo alla polarizzazione circolare  $s_3$  sia di almeno un ordine di grandezza inferiore agli altri due, relativi alla polarizzazione lineare, si può escludere che vi sia una consistente componente di polarizzazione circolare nella luce emessa.

Si può fornire una rappresentazione grafica del campo elettrico della luce emessa dal laser He-Ne, definendo i valori sul piano ortogonale al banco ottico nel modo seguente (tenendo conto che si osserva solo il rapporto tra le due componenti in  $x$  e  $y$ , in quanto non è noto il fattore di normalizzazione):

$$\begin{aligned}E_{0x} &= s_1 + \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \\ E_{0y} &= -s_1 + \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2},\end{aligned}$$

e lo sfasamento tra le due componenti è dato da  $\delta = \arctan(s_3/s_2)$ . Con un plot polare si ottiene il grafico di Figura 5, ove si osserva che la luce è polarizzata ellitticamente, ma essendo l'ellisse molto eccentrica essa si avvicina alla polarizzazione lineare.

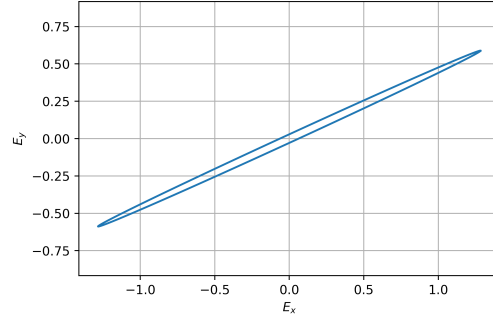


Figura 5: Rappresentazione grafica del campo elettrico della luce uscente dal laser He-Ne

## 4.3 Misura dei parametri di Stokes per luce polarizzata linearmente con un polaroid

Si mantiene inalterato il setup sperimentale aggiungendo un filtro polarizzatore prima della  $\lambda/4$ . Ruotando il polarizzatore si riesce a variare la polarizzazione del fascio mappando così i punti sulla sfera di Poincaré. Gli stati con polarizzazione pura si trovano sulla superficie della sfera in quanto  $s^2 = 1$  mentre gli stati misti si trovano all'interno suo interno avendo questi ultimi  $s^2 < 1$ . I dati sperimentali sono riportati in Tabella 7. Si riportano in Figura (6) e (7) i plot polari nel piano e nello spazio dei coefficienti di Stokes.

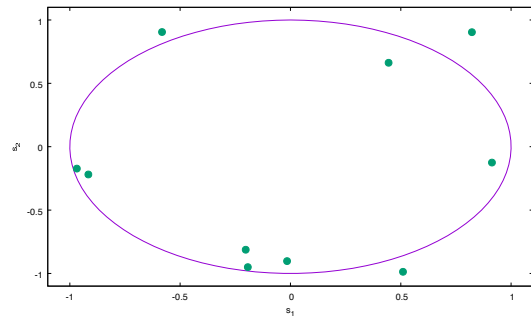


Figura 6: Rappresentazione grafica del cerchio di Poincaré nel sistema di coordinate di Stokes

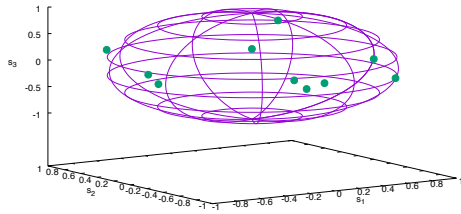


Figura 7: Rappresentazione grafica della sfera di Poincaré nel sistema di coordinate di Stokes

Osserviamo che i punti sperimentali sono per la maggior parte all'interno della sfera di Poincaré; i punti esterni con  $s^2 > 1$  non hanno senso fisico e sono da imputare ad impurezze nel polaroid.

## 5 Conclusioni

## 6 Appendice

Tabella 2: Punti sperimentali per la taratura della lamina  $\lambda/2$

$\theta$ [°] $\pm 0.1$	$I$ [V]	$\sigma_I$ [V]
60.0	2.46	0.04
66.0	1.74	0.02
72.0	0.87	0.01
78.0	0.21	0.01
84.0	0.030	0.001
90.0	0.22	0.01
96.0	0.77	0.02
102.0	1.60	0.01
108.0	2.52	0.04
114.0	3.44	0.01
120.0	4.00	0.02
126.0	4.33	0.02
132.0	4.40	0.10
138.0	4.00	0.10
144.0	3.28	0.04
150.0	2.40	0.02
156.0	1.56	0.02
162.0	0.82	0.01
168.0	0.226	0.002
174.0	0.033	0.001
180.0	0.239	0.002
186.0	0.73	0.01
192.0	1.51	0.02
198.0	2.50	0.02
204.0	3.44	0.03
210.0	4.12	0.02

Tabella 3: Punti sperimentali per la taratura della lamina  $\lambda/4$

$\xi$ [°] $\pm 0.1$	$I$ [V]	$\sigma_I$ [V]
0.0	6.64	0.02
6.0	7.10	0.05
12.0	7.40	0.01
18.0	7.23	0.02
24.0	6.70	0.01
30.0	6.02	0.01
36.0	5.21	0.02
42.0	4.52	0.02
48.0	3.97	0.01
54.0	3.76	0.01
60.0	3.87	0.01
66.0	4.23	0.01
72.0	4.87	0.02
78.0	5.75	0.05
84.0	6.60	0.02
90.0	7.32	0.01
96.0	7.75	0.02
102.0	7.78	0.02
108.0	7.57	0.01
114.0	7.13	0.02
120.0	6.48	0.05

Tabella 4: Punti sperimentali per la verifica dell'allineamento delle due lamine

$\theta[^\circ]$	$I[V]$	$\sigma I[V]$
0.0	3.92	0.01
10.0	3.75	0.01
20.0	3.61	0.01
30.0	3.57	0.02
40.0	3.66	0.01
50.0	3.800	0.005
60.0	3.950	0.005
70.0	4.07	0.01
80.0	4.07	0.005
90.0	3.97	0.01
100.0	3.83	0.01
110.0	3.690	0.005
120.0	3.63	0.01
130.0	3.66	0.01
140.0	3.77	0.01
150.0	3.880	0.005
160.0	3.960	0.005
170.0	3.95	0.001
180.0	3.870	0.005
190.0	3.780	0.005
200.0	3.670	0.005
210.0	3.67	0.01
220.0	3.77	0.01
230.0	3.930	0.005
240.0	4.06	0.001
250.0	4.070	0.005
260.0	4.04	0.01
270.0	3.93	0.01
280.0	3.810	0.005
290.0	3.73	0.01
300.0	3.720	0.005
310.0	3.77	0.01
320.0	3.89	0.01
330.0	3.980	0.005
340.0	4.00	0.01
350.0	3.97	0.01



Tabella 5: Punti sperimentali per la misura dei parametri di Stokes della luce uscente dal primo beam splitter polarizzatore

	Intensità [V]
$I_1$	$6.94 \pm 0.01$
$I'_1$	$0.090 \pm 0.001$
$I_2$	$4.04 \pm 0.01$
$I'_2$	$3.50 \pm 0.01$
$I_3$	$3.31 \pm 0.01$
$I'_3$	$3.20 \pm 0.01$

Tabella 6: Punti sperimentali per la misura dei parametri di Stokes della luce uscente direttamente dal laser

	Intensità [V]
$I_1$	$7.95 \pm 0.05$
$I'_1$	$1.68 \pm 0.01$
$I_2$	$1.22 \pm 0.01$
$I'_2$	$8.74 \pm 0.04$
$I_3$	$4.20 \pm 0.05$
$I'_3$	$3.90 \pm 0.02$

Tabella 7: Misure per la misura dei parametri di Stokes con polarizzatore

$\theta$ [°]	$I_1$ [V]	$\sigma_{I_1}$ [V]	$I'_1$ [V]	$\sigma_{I'_1}$ [V]	$I_2$ [V]	$\sigma_{I_2}$ [V]	$I'_2$ [V]	$\sigma_{I'_2}$ [V]	$I_3$ [V]	$\sigma_{I_3}$ [V]	$I'_3$ [V]	$\sigma_{I'_3}$ [V]
0	2.190	0.002	3.24	0.01	0.177	0.001	6.90	0.01	2.998	0.007	3.29	0.01
60	4.41	0.01	0.43	0.01	2.35	0.01	0.119	0.001	0.70	0.01	0.342	0.001
120	0.018	0.001	0.41	0.01	0.467	0.001	0.729	0.003	1.43	0.01	1.55	0.01
180	2.560	0.005	2.64	0.01	0.294	0.001	5.76	0.01	2.45	0.01	2.42	0.01
240	3.37	0.01	0.45	0.01	1.84	0.02	0.069	0.001	0.445	0.001	0.195	0.002
300	0.02	0.001	0.57	0.01	0.505	0.003	1.054	0.005	1.553	0.004	1.69	0.01
20	5.30	0.03	0.24	0.01	2.52	0.02	3.24	0.01	2.49	0.01	2.70	0.01
40	2.16	0.02	0.83	0.01	3.20	0.02	0.65	0.01	1.652	0.004	1.71	0.01
80	0.014	0.001	0.05	0.02	0.24	0.01	0.012	0.001	0.027	0.001	0.021	0.001
100	0.021	0.001	1.30	0.03	0.153	0.001	0.217	0.001	0.432	0.001	0.330	0.002
140	2.300	0.005	3.47	0.01	0.483	0.001	4.68	0.02	2.584	0.003	2.24	0.01
160	5.30	0.02	1.72	0.01	0.046	0.001	7.02	0.01	3.24	0.01	3.22	0.01