

Ottica e Laboratorio - canale M-Z

Relazione sulla seconda esperienza di laboratorio

L. Pietropaoli, A. Raschillà, S. Scacco

1 Modello teorico

Per una fenditura (*slit*) di larghezza b , l'intensità della diffrazione è data da:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{b\pi/\lambda \sin \theta}{b\pi/\lambda} \right]^2 \quad (1.1)$$

con minimi a:

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{b} \quad m = \{1, 2, 3, 4, \dots\}, \quad (1.2)$$

mentre per un'apertura circolare (*pinhole*) di diametro d :

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{2 J_1(d\pi/\lambda \sin \theta)}{d\pi/\lambda} \right]^2 \quad (1.3)$$

dove $J_1(x)$ è la prima funzione di Bessel del primo tipo, valutata in $x = d\pi/\lambda \sin \theta$. I minimi sono:

$$\sin \theta = c \frac{\lambda}{d} \quad c = \{1.22, 2.23, 3.24, 4.24, \dots\}. \quad (1.4)$$

2 Apparato sperimentale e discussione sulle incertezze

- ⌚ Laser THORLABS HNL050L
- ⌚ Attenuatore di intensità luminosa
- ⌚ Specchi e slitte orientabili
- ⌚ Fenditure e aperture circolari di varie dimensioni (scelte: $\varnothing = 0.20 \text{ mm} \div 0.40 \text{ mm}$)
- ⌚ Flessometro, carta millimetrata, oscuratore per il fascio laser (i.e. un cartoncino)
- ⌚ Fotodiodo su slitta a vite micrometrica (fondoscala del fotodiodo: $\simeq 12 \text{ V}$)

2.1 Misure dirette: vite micrometrica

La vite con cui si sposta il fotodiodo ha tacche di posizione $10 \mu\text{m}$, a cui assegniamo un errore di lettura di $5 \mu\text{m}$. Nella [sezione 3](#) è necessario anche identificare correttamente la posizione del minimo. L'identificazione del punto di minimo dovrebbe normalmente effettuarsi prendendo almeno 4 posizioni nelle vicinanze di esso, e fittando discesa e risalita del potenziale in tale regione. Purtroppo, per mancanza di tempo, ciò non è stato fatto. Piuttosto, la misura è stata realizzata da un solo sperimentatore, variando la posizione del diodo (nel modo più graduale che consentisse la resistenza della vite stessa) e trovando il minimo in base al feedback

ricevuto dalla lettura della d.d.p. al voltmetro. Lo sperimentatore ha stimato circa $20 \mu\text{m}$ di incertezza sulla posizione di minimo (come 4 tacche adiacenti sul micrometro), a causa della rozzezza di tale metodo.

L'incertezza sulla misura, quindi, risulta la somma in quadratura di questo contributo con l'incertezza strumentale della vite micrometrica, presa pari a circa la sua sensibilità ($\simeq 5 \mu\text{m}$): è chiaro che a dominare sia l'errore di identificazione del minimo, e non l'errore di lettura del calibro. Diversamente, per le misure che verranno discusse in [sezione 4](#) l'incertezza da attribuire sulla posizione è più bassa perché non c'è alcun tipo di *negative feedback* della misura di posizione: si è stabilito un intervallo teorico $\Delta x = 10 \mu\text{m}$ e si è registrata l'intensità letta sul voltmetro a $x_0 + i \cdot \Delta x$, per $i \simeq 50 \div 100$ punti.

L'incertezza sulla posizione, per queste misure, è stata stimata essere pari alla somma in quadratura dell'incertezza strumentale della vite e di un contributo ($10 \mu\text{m}$) che include eventuali errori di parallasse oppure dovuti al buio della stanza, in ogni caso legati alla lettura. Si veda [Tabella 3](#) e [Tabella 4](#).

2.2 Misure dirette: voltmetro

L'indicazione fornita dal costruttore per l'incertezza da assegnare alla lettura del multimetro è pari a $\sigma_l = 0.05\%$ of rdg + 3 dgt, quindi dipende dalla scala. Per la misura, si è preso il rumore in assenza di luce del laser, che causa oscillazioni stimiamo essere $r = 4 \pm 1 \text{ mV}$ (per entrambi i multimetri utilizzati nell'esperienza), dovute alla fluttuazione del valore letto. Ad ogni misura di potenziale, verrà sottratto tale rumore. Poiché la lettura non era mai stabile, si è associata anche un'incertezza dovuta alla fluttuazione σ_f del valore misurato: essa si è valutata punto per punto in base all'oscillazione attraverso una stima conservativa, ma in linea di massima si è notato che più il potenziale cresceva, più la misura oscillava (circa 10 mV per 1 V).

Supposta l'ipotesi che la lettura, il rumore e la fluttuazione siano Gaussianamente distribuiti, l'errore complessivo è allora $\sigma^2 = \sigma_l^2 + \sigma_r^2 + \sigma_f^2 \simeq \sigma_f^2$. In particolare, quest'ultimo contributo domina sempre in quadratura rispetto al contributo indicato dal costruttore, e al contributo di rumore.

3 Misura della lunghezza d'onda λ

L'[Equazione 1.2](#) e l'[Equazione 1.4](#) descrivono le posizioni angolari attese dei minimi nelle figure di diffrazione prodotte dal fascio laser fatto passare rispettivamente attraverso una slit e un pinhole. Ponendo il rivelatore a distanza L

dalla slitta¹ e misurando **posizione del fotodiodo** (regolata da una vite micrometrica) e **intensità luminosa** (al multimetro²) nei minimi e nel massimo assoluto, si è immediatamente risaliti a

$$\sin \theta \simeq \theta = \frac{x_{min} - x_{max}}{L} \quad (\theta \text{ piccolo}) .$$

Si è poi effettuato un fit lineare ai punti (m, θ) e (c, θ) - rispettivamente per slit e pinhole -, ricavando da quest'ultimo una **stima per la lunghezza d'onda**. Sono state effettuate prove per due fenditure ($b = 0.20 \text{ mm}, 0.30 \text{ mm}$) e per due pinholes ($d = 0.30 \text{ mm}, 0.40 \text{ mm}$).

Si sono presi i dati nella forma mostrata in [Tabella 1](#), cioè misurando posizione e d.d.p. del massimo e di tre minimi (due da un lato e uno dall'altro, per accorgerci di eventuali disallineamenti dell'apparato sperimentale) per le slits e del massimo e di due minimi (una da un lato e una dall'altro) per i pinholes. Si è inoltre tentato di ridurre l'effetto sistematico del rumore misurandolo prima delle prese dati e poi sottraendolo ai valori di tensione presi.

N.B.: Durante l'analisi dati ci si è accorti che un punto è stato preso male: si tratta della posizione del massimo di intensità per il "pinhole 0.30 mm". Originariamente era stato letto a 8.12 mm ma successivamente ci si è accorti di aver probabilmente letto male la prima cifra decimale, che anziché essere 1 era 6, perciò 8.62 mm. Tenendo a mente la difficoltà in laboratorio nel valutare il "mezzo millimetro" sulla vite micrometrica, abbiamo deciso di eseguire un breve test di ipotesi sulla posizione del punto Il χ^2 per d.o.f. relativo a 8.12 mm è circa 37, ed è estremamente sfavorito rispetto all'ipotesi relativa a 8.62 mm. Ciò ci ha convinti che la misura era stata giudicata esattamente di mezzo millimetro in difetto.

La valutazione è sembrata soddisfacente, come si vede in [Figura 1](#), dove sono visibili i fit lineari ai risultati sperimentali delle singole misure e i relativi valori di χ^2 . Si osserva come per la slit e per il pinhole più piccoli si abbia una maggiore precisione sulla misura - che risulta in un χ^2 per d.o.f. più basso rispetto ai casi in cui $b = 0.30 \text{ mm}$ e $d = 0.40 \text{ mm}$. Tale maggior precisione però non sembra rispecchiarsi, ai nostri occhi, in maggiore accuratezza nel caso della slit più piccola, i cui dati sembrano implicare una lunghezza d'onda incompatibile a oltre 7σ con il valore di aspettazione pari a 632.8 nm . Si è calcolata la media aritmetica dei risultati con relativa propagazione delle incertezze, che ci è sembrata una buona soluzione per quattro misure condotte non con lo stesso identico apparato sperimentale ma comunque riproducibili e ripetibili. Si è trovato

$$\lambda = \frac{\sum_i \lambda_i}{4} = 611.4 \pm 7.0 \text{ nm} ,$$

ossia un risultato compatibile a 4σ con il valore di aspettazione. Si è inoltre scelto di presentare **un altro risultato**, quello di una media pesata usando come pesi l'inverso della varianza gaussiana³ associata a ciascuna stima di λ ma

¹Le fenditure e i pinhole sono stati montati su una slitta orientabile, che è stata opportunamente regolata prima di ogni presa dati - ogni volta che si è cambiato apertura -, assieme alla slitta su cui era montato il rivelatore, per assicurare la massima accettanza possibile al fotodiodo e l'allineamento ideale della figura di diffrazione.

²Sappiamo infatti che l'intensità luminosa misurata è direttamente proporzionale al voltaggio che il fotodiodo produce, nel suo regime di lavoro - che è stato per sicurezza tenuto sotto agli 8 V -, in uscita.

³Dove si è quindi assunto che la variabile λ si distribuisce gaussianamente.

escludendo il caso "slit 0.20 mm" in quanto giudicato frutto di una misura probabilmente mal eseguita. Dalla media si è trovato

$$\lambda = \frac{\sum_i \lambda_i / \sigma_i^2}{\sum_i 1 / \sigma_i^2} = 631.1 \pm 7.5 \text{ nm} .$$

Anche in questo l'incertezza sul risultato si è ridotta perché proveniente da tre misure di cui si è effettuata la combinazione dei risultati. Il valore trovato risulta, stavolta, compatibile ben entro 1σ con quello atteso, perciò ci sarebbe da ritenersi soddisfatti. Venendo al perché del risultato incompatibile ($\lambda^{S20} = 565 \pm 10 \text{ nm}$): anzitutto, non ci sentiamo di aver assegnato incertezze sovraffestate alle misure di posizione, poiché sono state prese secondo lo stesso protocollo con cui sono state prese quelle relative alle altre fenditure, che producono risultati ragionevoli. Una spiegazione plausibile è che la fenditura, ad esempio, non fosse larga esattamente 0.20 mm ma, ad esempio, 0.22 mm per un difetto di realizzazione. In tal caso, con gli stessi punti sperimentali si avrebbe trovato una lunghezza d'onda di $621 \pm 10 \text{ nm}$. Un'altra possibile motivazione è l'allineamento della struttura maschera-fenditura-fotodiodo: ci riserviamo una spiegazione più dettagliata più avanti, in [sottosezione 4.2](#), dove questo problema è sembrato ripresentarsi.

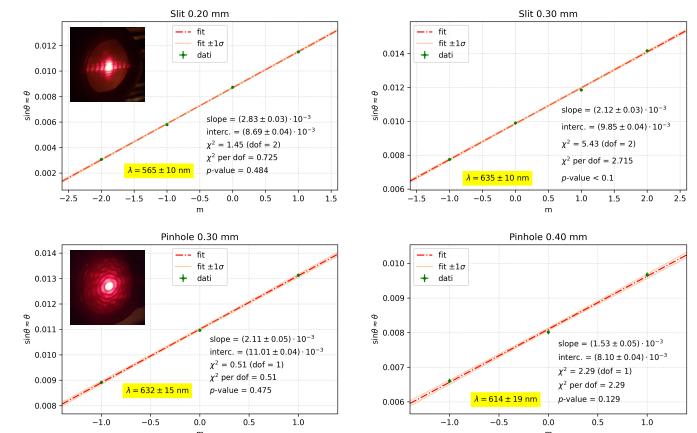


Figura 1: Fit lineari ai dati sperimentali per i minimi e massimi delle figure di diffrazione prodotte su un fotodiodo da fenditure e aperture circolari di dimensione variabile. Nelle foto **in alto a sx** si possono osservare le figure diffrattive visibili sul fotorivelatore per la slit e il pinhole più piccoli.

4 Figura di diffrazione

In questa parte dell'esperienza, si sono decise a priori delle posizioni della vite micrometrica (ogni $100 \mu\text{m}$), e si è proceduto a misurare l'intensità del potenziale prodotto dal laser sul fotodiodo, ricostruendo i punti che descrivono l'intera figura diffrattiva. Incertezze assegnate come in [sottosezione 2.1](#) e [sottosezione 2.2](#), dati visibili in [sezione 7](#).

Per tutti i fit che verranno eseguiti, le incertezze relative sulle posizioni sono molto minori ($10 \mu\text{m}$ su diversi mm: $\delta \approx 1/500$) rispetto alle fluttuazioni relative del potenziale registrato dal multimetro (diversi 10 mV su al massimo 1 V : $\delta > 1/100$), e per questo le trascureremo. Vale la pena osservare qui che l'intensità della diffrazione dipende solo dal parametro adimensionale $k = b/\lambda$ per la slit e $k = d/\lambda$ per il

pinhole, pertanto è impossibile fissare contemporaneamente b e λ separatamente (o d e λ), ma è sempre necessario fissare uno dei due.

4.1 Con slit di spessore 0.30 mm

Si sono acquisiti 67 punti: da 3.5 mm a 10.1 mm, attorno al massimo centrale a 6.82 mm, a passi di 0.1 mm. Ipotizzando che il potenziale misurato $V(\theta) \propto I(\theta)$, e cioè che sia modulato secondo la funzione descritta in [Equazione 1.1](#), si è fittato per $k = b/\lambda$ adimensionale e V_0 valore di potenziale nel massimo centrale (quindi 2 vincoli e 65 gradi di libertà). In particolare, per la fenditura:

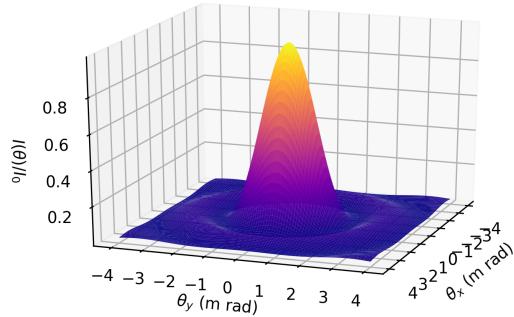
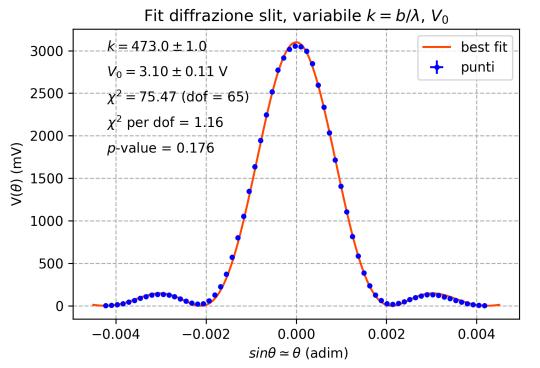


Figura 2: **Sopra**, fit della figura di diffrazione per slit, con parametro adimensionale $k = b/\lambda = 473.0 \pm 1.0$. Con i dati in [Tabella 3](#) e le incertezze assegnate, il χ^2 viene perfettamente accettabile in relazione ai gradi di libertà. **Sotto**, ricostruzione 3D della figura di diffrazione osservata sul fotodiodo, normalizzata ad 1, con i parametri ottenuti dal fit.

Fissando il valore $b = 0.30$ mm come esatto, il valore della lunghezza d'onda è $\lambda = 634.2 \pm 1.4$ nm, che è perfettamente compatibile, entro 1σ , col valore di $\lambda = 632.8$ nm dichiarato dal costruttore del laser. L'eventuale leggera discrepanza positiva è probabilmente dovuta ad un allineamento non perfetto tra il laser, la fenditura e il fotodiodo (che amplia la figura diffrattiva), ma è comunque una discrasia molto ridotta. Invece, fissando come esatto il valore di $\lambda = 632.8$ nm, desumiamo che lo spessore della fenditura è $b = 0.2993 \pm 0.0006$ mm, anche esso compatibile entro 1σ dal valore atteso di $b = 0.30$ mm.

4.2 Con pinhole di diametro 0.20 mm

Sono stati presi 64 punti: da 3.5 mm a 9.8 mm, attorno al massimo centrale a 6.71 mm, a passi di 0.1 mm. L'i-

potesi è sempre che il potenziale rilevato dal fotodiode sia $V(\theta) \propto I(\theta)$, secondo la funzione descritta in [Equazione 1.3](#). In questo caso, si osserva che utilizzando i valori noti di $d = 0.20$ mm, $\lambda = 632.8$ nm, i punti presentano una certa discrepanza rispetto al valore atteso dell'andamento di Bessel. Causa tempo ridotto, non è stato possibile acquisire punti al di là del primo minimo. Sarebbe forse stato più conveniente muoversi con la vite micrometrica a passi di 0.2 mm, così da vedere un intervallo più grande, con lo stesso tempo di presa dati. La frenesia del momento purtroppo non ci ha fatto pensare a questa soluzione, perciò lavoriamo con ciò che abbiamo.

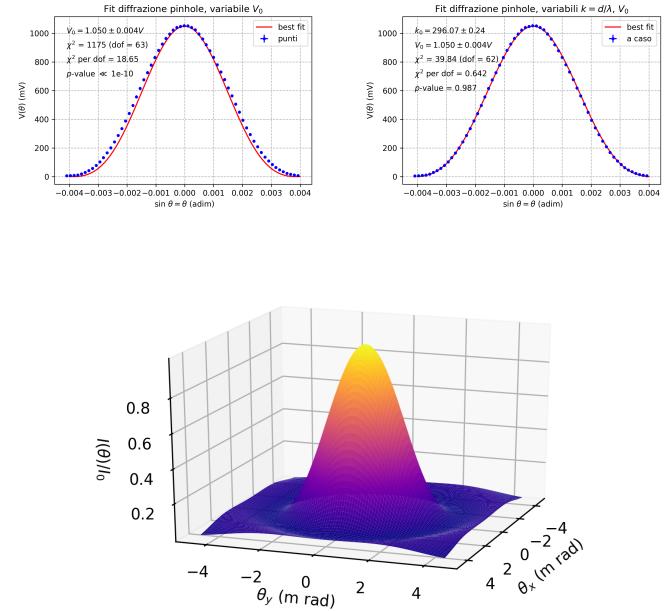


Figura 3: **In alto a sinistra**, figura di diffrazione avendo fissato i valori attesi di d e λ . Si noti la discrasia tra la curva attesa e i punti acquisiti, che portano ad un χ^2 inaccettabilmente grande. **In alto a destra** fit della figura di diffrazione per pinhole, con parametro adimensionale $k = b/\lambda = 296.07 \pm 0.23$. Con i dati in [Tabella 4](#) e le incertezze assegnate, il χ^2 viene abbastanza ridotto in relazione ai gradi di libertà. **Sotto**, ricostruzione 3D della figura di diffrazione osservata sul fotodiodo, normalizzata ad 1, con i parametri ottenuti dal fit.

Il valore atteso del parametro adimensionale $k_{att} = d/\lambda = 315.96$ (valore esatto), è sicuramente errato con i dati che abbiamo. Pertanto, si è deciso di fissare per k e per V_0 i punti sperimentali, così da ottenere la figura in alto a destra in [Figura 3](#). Osserviamo innanzitutto che il χ^2 è abbastanza piccolo, probabilmente ciò è dovuto ad una leggera sovrastima delle incertezze sui potenziali. Le code della figura di diffrazione, causa forte sensibilità al rumore e a errori sistematici esterni, in genere forniscono i punti con più discrepanza dal valore atteso (e quindi χ^2 maggiore). Non essendo riusciti a prendere tali punti, il χ^2 è rimasto basso. In secondo luogo, k si discosta di circa 100σ dal valore atteso k_{att} con i parametri in gioco. Poiché il laser utilizzato è sempre lo stesso, è ragionevole supporre che il valore corretto di λ sia quello trovato al punto precedente, che è compatibile con la lunghezza d'onda del laser elio-neon, $\lambda = 634.2 \pm 1.4$ nm. Allora, propagando le incertezze, $d = k\lambda = 0.1877 \pm 0.0004$ mm, e si trova a 30σ dal 0.20 mm che vorremmo. Per spiegare ciò, possiamo innanzitutto sup-

porre che la larghezza del *pinhole* non sia esattamente di 0.2 mm, ma possa essere leggermente ridotta, e soprattutto possa avere una sua incertezza (che il costruttore non ci ha fornito).

Non crediamo che ciò, tuttavia, basti a giustificare le discrasie sperimentali. Oltre a questo, l'ipotesi più accreditata è un cattivo allineamento tra laser-pinhole-fotodiode, di cui purtroppo non ci siamo assicurati causa il poco tempo restante al termine dell'esperienza. Se chiamiamo ϕ l'angolo tra la normale uscente dal *pinhole* e la direzione di propagazione del laser, per percepire come diametro del pinhole $d = d_{vero} \cos \phi$, è necessario che:

$$\phi = \arccos \frac{d}{d_{vero}} \pm \frac{\sigma[d/d_{vero}]}{\sqrt{1 - (d/d_{vero})^2}} = 20.2 \pm 0.3^\circ$$

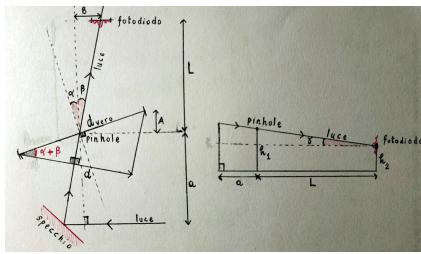


Figura 4: Schema geometrico di tutte le possibili cause di distorsione della figura di diffrazione. A sinistra, l'apparato è visto dall'alto. A destra, è visto a filo del tavolo di lavoro.

Ora, dalla Figura 4, si vede chiaramente che i contributi di deviazione sono gli angoli α, β, γ :

$$\sin \alpha = \frac{2A}{d_{vero}} \quad \tan \beta = \frac{B}{L} \quad \tan \gamma = \frac{\Delta h}{L} \approx 0$$

Poiché $h_1 - h_2$ è al più di qualche millimetro, e L è circa un metro, il contributo di deviazione in altezza è quasi nullo. Se $\alpha \approx \sin \alpha, \beta \approx \tan \beta$, allora l'angolo totale di deviazione è $\phi = \alpha + \beta \simeq 2A/d_{vero} + B/L$. Se si è superficiali nell'allineamento, è plausibile che $A \approx 0.02 \div 0.03$ mm e $B \approx 3 \div 5$ cm. Ciò risulta, pertanto, in una deviazione $\phi \approx 0.25 \div 0.35$ rad $\approx 15 \div 20^\circ$. Probabilmente, perciò, responsabile per le discrepanze è principalmente il cattivo allineamento laser-pinhole-fotodiodo, a cui si può però aggiungere una certa correzione dovuta ad una variazione della larghezza del *pinhole*, il cui valore potrebbe, appunto, non essere esatto.

5 Figura di diffrazione con capello

In accordo al principio di Babinet, la figura di diffrazione prodotta da un filo molto sottile, approssimabile ad esempio con un capello, è uguale a quella di una fenditura di larghezza pari al suo spessore, seguendo dunque l'[Equazione 1.2](#). Per verificare ciò, si è posto un foglio di carta millimetrata davanti al fotodiode in modo da visualizzare il laser diffuso su di esso. Per ogni punto di minimo si è presa la sua distanza dal massimo centrale, la cui posizione è stata posta nello zero.

La misurazione descritta sopra è stata effettuata a partire dall'immagine in [Equazione 5.1](#) (sopra). I punti sperimentali sono visibili in [Tabella 2](#). A causa della scarsa qualità della foto si è attribuito un errore di lettura sui singoli valori pari a 0.5 mm. Il grafico seguente mostra i punti

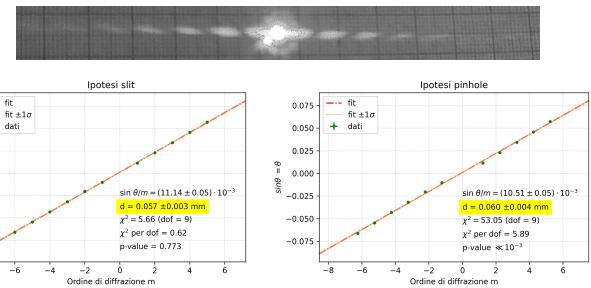


Figura 5: Sopra, l'immagine dalla quale sono stati estrapolati i dati; la colorazione è stata alterata in maniera tale da rendere più evidente le suddivisioni della carta millimetrata. Sotto, grafico dei punti con incertezza e della retta di best fit: a sx nell'ipotesi di fenditura, a dx nell'ipotesi di foro.

di minimo in funzione dell'ordine m e la loro retta di miglior fit. A parità di incertezze assegnate, il valore di χ^2 mostra come sia più accettabile il modello di fenditura. Attraverso la regressione lineare si è ottenuta la migliore stima per il coefficiente angolare $\sin \theta/m$ dal quale si è calcolato lo spessore d del capello, tramite la relazione

$$d = \frac{m}{\sin(\theta)} \lambda = 0.057 \pm 0.003 \text{ mm}$$

ove λ è quello ricavato dallo slit da 0.30 mm (pari a 634.2 ± 1.2 nm), e il modello utilizzato è quello della figura di diffrazione da fenditura (e non da *pinhole*, che risulta incompatibile con l'andamento lineare che abbiamo visto). L'incertezza risulta molto ridotta dal fit lineare, ma noi siamo scettici di questo risultato a causa dell'ambigua definizione del misurando. Un capello non è uno strumento di precisione, né è perfettamente piatto (anzi, è cilindrico), pertanto da un lato il suo spessore potrebbe non essere costante ma variabile, e dall'altro il pattern di diffrazione non è esattamente quello di singola fenditura (lo è solo con buona approssimazione), ma piuttosto è il risultato dello scattering della luce su un oggetto cilindrico. Per questo, il risultato ottenuto va preso più come una stima approssimata. Possiamo solo dire che la sua dimensione è abbastanza ragionevole, secondo confronto con valori trovati in rete (che individuano un range di spessore di $0.06 \div 0.1$ mm).

6 Conclusioni

Segnaliamo, in questa sezione, alcune eccezioni e criticità: **1.** La prima presa dati su *slit* di 0.20 mm, e i dati in [sottosezione 4.2](#) sono probabilmente il frutto di inesperienza e cattivo allineamento iniziale, e andrebbero ripetuti. **2.** Si sarebbero dovute eseguire più prove con diversi spessori di fenditure e diametri di aperture circolari, oltre alla ricerca di minimi oltre il secondo ordine in almeno una delle prese dati. Purtroppo a causa del tempo limitato, ciò non è stato possibile. **3.** Sempre in [sottosezione 4.2](#), si sarebbero dovuti prendere punti oltre il minimo di primo ordine, ma anche questo non è stato possibile causa tempo limitato e non ottimale organizzazione della presa dati.

In linea di massima, a parte questi problemi minori, possiamo però dirci soddisfatti delle misure effettuate e della loro compatibilità con i valori attesi, e siamo contenti dell'assegnazione complessiva delle incertezze.

7 Dati sperimentali

- distanza tra fenditura e fotodiodo: $L = 786.0 \pm 0.5$ mm (misura col metro)
- rumore multimetero: 4 ± 1 mV

Misure di minimi nella figura di diffrazione, slits e pinholes							
apertura	\oslash (mm)	x_{max} (mm)	V_{max} (V) ($\uparrow 20$ V)	x_{min}^L (mm)	V_{min}^L (mV) ($\uparrow 200$ mV)	x_{min}^R (mm)	V_{min}^R (mV)
slit	0.20 ± 0.03	6.86 ± 0.05	6.80 ± 0.30	9.05 ± 0.05	25 ± 3	4.56 ± 0.05	28 ± 3
						2.41 ± 0.05	14 ± 3
slit	0.30 ± 0.03	7.78 ± 0.05	4.10 ± 0.30	9.21 ± 0.05	33 ± 3	6.09 ± 0.05	43 ± 3
				11.13 ± 0.05	9 ± 3		
pinhole	0.30 ± 0.03	8.62 ± 0.05	7.81 ± 0.30	10.32 ± 0.05	34 ± 3	7.01 ± 0.05	25 ± 3
pinhole	0.40 ± 0.03	6.30 ± 0.05	3.21 ± 0.30	5.19 ± 0.05	37 ± 3	7.01 ± 0.05	45 ± 3

Tabella 1: Tabella dei dati relativi alla misura dei minimi (e del massimo) di intensità della figura di diffrazione prodotta da slits e pinholes di varie dimensioni (\oslash indica il diametro per i pinholes e la larghezza per le slits).

x - x_{max} (mm)	-52.0	-43.0	-34.0	-25.0	-16.0	-8.0	max	9.0	18.0	27.0	36.0	45.0
σ_x (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabella 2: Tabella dei dati relativi alla misura dei minimi di intensità per la figura di diffrazione prodotta da un capello, approssimazione di filo molto sottile.

Figura diffrattiva, slit b = 0.30 mm

$x - x_{max}$ (mm)	θ (mrad)	V (mV)	scala (V)
-3.32 ± 0.01	-4.22 ± 0.02	6 ± 3	0.200
-3.22 ± 0.01	-4.10 ± 0.02	8 ± 3	0.200
-3.12 ± 0.01	-3.97 ± 0.02	17 ± 3	0.200
-3.02 ± 0.01	-3.84 ± 0.02	30 ± 3	0.200
-2.92 ± 0.01	-3.72 ± 0.02	47 ± 5	0.200
-2.82 ± 0.01	-3.59 ± 0.02	68 ± 5	0.200
-2.72 ± 0.01	-3.46 ± 0.02	93 ± 5	0.200
-2.62 ± 0.01	-3.33 ± 0.02	113 ± 10	0.200
-2.52 ± 0.01	-3.21 ± 0.02	129 ± 10	0.200
-2.42 ± 0.01	-3.08 ± 0.02	139 ± 10	0.200
-2.32 ± 0.01	-2.95 ± 0.02	138 ± 10	0.200
-2.22 ± 0.01	-2.82 ± 0.02	130 ± 10	0.200
-2.12 ± 0.01	-2.70 ± 0.02	112 ± 10	0.200
-2.02 ± 0.01	-2.57 ± 0.02	86 ± 20	0.200
-1.92 ± 0.01	-2.44 ± 0.02	58 ± 20	0.200
-1.82 ± 0.01	-2.32 ± 0.02	36 ± 20	0.200
-1.72 ± 0.01	-2.19 ± 0.02	24 ± 20	0.200
-1.62 ± 0.01	-2.06 ± 0.02	29 ± 20	0.200
-1.52 ± 0.01	-1.93 ± 0.02	64 ± 20	0.200
-1.42 ± 0.01	-1.81 ± 0.02	131 ± 30	0.200
-1.32 ± 0.01	-1.68 ± 0.02	230 ± 30	20.00
-1.22 ± 0.01	-1.55 ± 0.02	375 ± 30	20.00
-1.12 ± 0.01	-1.42 ± 0.02	575 ± 30	20.00
-1.02 ± 0.01	-1.30 ± 0.02	805 ± 30	20.00
-0.92 ± 0.01	-1.17 ± 0.02	1106 ± 30	20.00
-0.82 ± 0.01	-1.04 ± 0.02	1350 ± 30	20.00
-0.72 ± 0.01	-0.92 ± 0.02	1640 ± 30	20.00
-0.62 ± 0.01	-0.79 ± 0.02	1950 ± 30	20.00
-0.52 ± 0.01	-0.66 ± 0.02	2250 ± 30	20.00
-0.42 ± 0.01	-0.53 ± 0.02	2520 ± 30	20.00
-0.32 ± 0.01	-0.41 ± 0.02	2776 ± 30	20.00
-0.22 ± 0.01	-0.28 ± 0.02	2920 ± 30	20.00
-0.12 ± 0.01	-0.15 ± 0.02	3020 ± 30	20.00
-0.02 ± 0.01	-0.03 ± 0.02	3060 ± 30	20.00
0.08 ± 0.01	0.10 ± 0.02	3050 ± 30	20.00

$x - x_{max}$ (mm)	θ (mrad)	V (mV)	scala (V)
0.18 ± 0.01	0.23 ± 0.02	3000 ± 30	20.00
0.28 ± 0.01	0.36 ± 0.02	2850 ± 30	20.00
0.38 ± 0.01	0.48 ± 0.02	2600 ± 30	20.00
0.48 ± 0.01	0.61 ± 0.02	2340 ± 30	20.00
0.58 ± 0.01	0.74 ± 0.02	2040 ± 30	20.00
0.68 ± 0.01	0.87 ± 0.02	1720 ± 25	20.00
0.78 ± 0.01	0.99 ± 0.02	1410 ± 25	20.00
0.88 ± 0.01	1.12 ± 0.02	1010 ± 25	20.00
0.98 ± 0.01	1.25 ± 0.02	820 ± 20	20.00
1.08 ± 0.01	1.37 ± 0.02	590 ± 20	20.00
1.18 ± 0.01	1.50 ± 0.02	390 ± 20	20.00
1.28 ± 0.01	1.63 ± 0.02	240 ± 15	20.00
1.38 ± 0.01	1.76 ± 0.02	130 ± 15	20.00
1.48 ± 0.01	1.88 ± 0.02	65 ± 15	0.200
1.58 ± 0.01	2.01 ± 0.02	30 ± 15	0.200
1.68 ± 0.01	2.14 ± 0.02	21 ± 15	0.200
1.78 ± 0.01	2.26 ± 0.02	32 ± 15	0.200
1.88 ± 0.01	2.39 ± 0.02	53 ± 10	0.200
1.98 ± 0.01	2.52 ± 0.02	79 ± 10	0.200
2.08 ± 0.01	2.65 ± 0.02	101 ± 10	0.200
2.18 ± 0.01	2.77 ± 0.02	120 ± 10	0.200
2.28 ± 0.01	2.90 ± 0.02	134 ± 10	0.200
2.38 ± 0.01	3.03 ± 0.02	134 ± 10	0.200
2.48 ± 0.01	3.16 ± 0.02	125 ± 15	0.200
2.58 ± 0.01	3.28 ± 0.02	108 ± 15	0.200
2.68 ± 0.01	3.41 ± 0.02	90 ± 15	0.200
2.78 ± 0.01	3.54 ± 0.02	68 ± 15	0.200
2.88 ± 0.01	3.66 ± 0.02	49 ± 10	0.200
2.98 ± 0.01	3.79 ± 0.02	30 ± 10	0.200
3.08 ± 0.01	3.92 ± 0.02	17 ± 5	0.200
3.18 ± 0.01	4.05 ± 0.02	9 ± 3	0.200
3.28 ± 0.01	4.17 ± 0.02	7 ± 3	0.200

Tabella 3: Punti sperimentali relativi alla ricostruzione della figura diffrattiva emessa dal laser attraverso una slit di ampiezza $d = 0.30\text{ mm}$, con $x_{max} = 6.82\text{ mm}$. Per la giustificazione delle incertezze, si veda [sottosezione 2.2](#).

Figura diffrattiva, pinhole $d = 0.20$ mm

$x - x_{\max}$ (mm)	θ (mrad)	V (mV)	scala (V)
-3.21 ± 0.01	-4.09 ± 0.02	10 ± 3	20.00
-3.11 ± 0.01	-3.96 ± 0.02	11 ± 3	20.00
-3.01 ± 0.01	-3.84 ± 0.02	13 ± 3	20.00
-2.91 ± 0.01	-3.71 ± 0.02	16 ± 3	20.00
-2.81 ± 0.01	-3.58 ± 0.02	23 ± 4	20.00
-2.71 ± 0.01	-3.45 ± 0.02	34 ± 4	20.00
-2.61 ± 0.01	-3.33 ± 0.02	47 ± 4	20.00
-2.51 ± 0.01	-3.20 ± 0.02	62 ± 5	20.00
-2.41 ± 0.01	-3.07 ± 0.02	83 ± 5	20.00
-2.31 ± 0.01	-2.95 ± 0.02	107 ± 5	20.00
-2.21 ± 0.01	-2.82 ± 0.02	137 ± 5	20.00
-2.11 ± 0.01	-2.69 ± 0.02	170 ± 8	20.00
-2.01 ± 0.01	-2.56 ± 0.02	205 ± 8	20.00
-1.91 ± 0.01	-2.44 ± 0.02	247 ± 8	20.00
-1.81 ± 0.01	-2.31 ± 0.02	292 ± 8	20.00
-1.71 ± 0.01	-2.18 ± 0.02	340 ± 8	20.00
-1.61 ± 0.01	-2.05 ± 0.02	393 ± 10	20.00
-1.51 ± 0.01	-1.93 ± 0.02	445 ± 10	20.00
-1.41 ± 0.01	-1.80 ± 0.02	501 ± 10	20.00
-1.31 ± 0.01	-1.67 ± 0.02	561 ± 10	20.00
-1.21 ± 0.01	-1.55 ± 0.02	620 ± 10	20.00
-1.11 ± 0.01	-1.42 ± 0.02	680 ± 10	20.00
-1.01 ± 0.01	-1.29 ± 0.02	730 ± 10	20.00
-0.91 ± 0.01	-1.16 ± 0.02	783 ± 10	20.00
-0.81 ± 0.01	-1.04 ± 0.02	836 ± 10	20.00
-0.71 ± 0.01	-0.91 ± 0.02	886 ± 10	20.00
-0.61 ± 0.01	-0.78 ± 0.02	930 ± 10	20.00
-0.51 ± 0.01	-0.66 ± 0.02	969 ± 10	20.00
-0.41 ± 0.01	-0.53 ± 0.02	999 ± 10	20.00
-0.31 ± 0.01	-0.40 ± 0.02	1027 ± 10	20.00
-0.21 ± 0.01	-0.27 ± 0.02	1045 ± 10	20.00
-0.11 ± 0.01	-0.15 ± 0.02	1052 ± 10	20.00
-0.01 ± 0.01	-0.02 ± 0.02	1057 ± 10	20.00
0.09 ± 0.01	0.11 ± 0.02	1056 ± 10	20.00

$x - x_{\max}$ (mm)	θ (mrad)	V (mV)	scala (V)
0.19 ± 0.01	0.24 ± 0.02	1045 ± 10	20.00
0.29 ± 0.01	0.36 ± 0.02	1029 ± 10	20.00
0.39 ± 0.01	0.49 ± 0.02	1000 ± 10	20.00
0.49 ± 0.01	0.62 ± 0.02	965 ± 10	20.00
0.59 ± 0.01	0.74 ± 0.02	925 ± 10	20.00
0.69 ± 0.01	0.87 ± 0.02	883 ± 10	20.00
0.79 ± 0.01	1.00 ± 0.02	837 ± 10	20.00
0.89 ± 0.01	1.13 ± 0.02	785 ± 10	20.00
0.99 ± 0.01	1.25 ± 0.02	735 ± 10	20.00
1.09 ± 0.01	1.38 ± 0.02	682 ± 10	20.00
1.19 ± 0.01	1.51 ± 0.02	623 ± 10	20.00
1.29 ± 0.01	1.63 ± 0.02	568 ± 10	20.00
1.39 ± 0.01	1.76 ± 0.02	510 ± 10	20.00
1.49 ± 0.01	1.89 ± 0.02	454 ± 10	20.00
1.59 ± 0.01	2.02 ± 0.02	398 ± 10	20.00
1.69 ± 0.01	2.14 ± 0.02	345 ± 10	20.00
1.79 ± 0.01	2.27 ± 0.02	298 ± 10	20.00
1.89 ± 0.01	2.40 ± 0.02	252 ± 8	20.00
1.99 ± 0.01	2.53 ± 0.02	213 ± 8	20.00
2.09 ± 0.01	2.65 ± 0.02	173 ± 8	20.00
2.19 ± 0.01	2.78 ± 0.02	141 ± 5	20.00
2.29 ± 0.01	2.91 ± 0.02	114 ± 5	20.00
2.39 ± 0.01	3.03 ± 0.02	89 ± 5	20.00
2.49 ± 0.01	3.16 ± 0.02	68 ± 4	20.00
2.59 ± 0.01	3.29 ± 0.02	51 ± 4	20.00
2.69 ± 0.01	3.42 ± 0.02	39 ± 4	20.00
2.79 ± 0.01	3.54 ± 0.02	27 ± 3	20.00
2.89 ± 0.01	3.67 ± 0.02	20 ± 3	20.00
2.99 ± 0.01	3.80 ± 0.02	15 ± 3	20.00
3.09 ± 0.01	3.92 ± 0.02	11 ± 3	20.00

Tabella 4: Punti sperimentali relativi alla ricostruzione della figura diffrattiva emessa dal laser attraverso un pinhole di ampiezza $d = 0.20$ mm, con $x_{\max} = 6.71$ mm. Per la giustificazione delle incertezze, si veda [sottosezione 2.2](#).