

Modern Fizika Laboratórium
Fizika BSc

22. Kvantumradír

Mérést végezték:

Márkus Bence Gábor

Kálmán Dávid

Kedd délelőtti csoport

Mérés ideje: 05/15/2012

Beadás ideje: 05/26/2012

Érdemjegy:

1. A mérés rövid leírása

Mérésünk során rekonstruáltuk, egy a közelmúltban publikált kísérlet eredményét, a kvantumradírt. Igazoltuk, hogy a kvantummechanika állításai tényleg helytállóak, cáfoltuk a világ lokálisát és a rejtett paraméteres meggondolásokat.

2. Méréshez használt eszközök

- Mach–Zehnder interferométer
- He – Ne lézer
- Lencse
- Digitális fényképezőgép manuális beállításokkal
- Mérőszalag

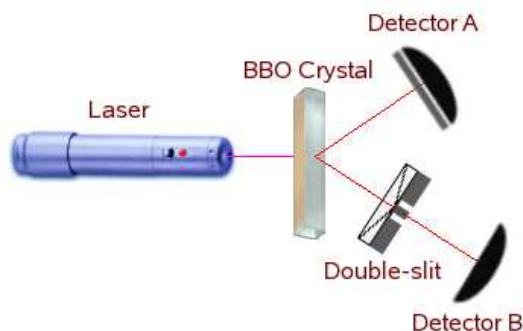
3. Rövid elméleti összefoglaló

Az eredeti kísérlettel szemben mi a mérést nem egyfotonos rendszerrel valósítottuk meg, hanem egy monokromatikus fénnyaláb segítségével. Ily módon a jelenség klasszikusan is magyarázhatóvá vált, ám ez a kvantummechanikai magyarázattal teljes összhangban van.

3.1. Eredeti kvantumradír kísérlet

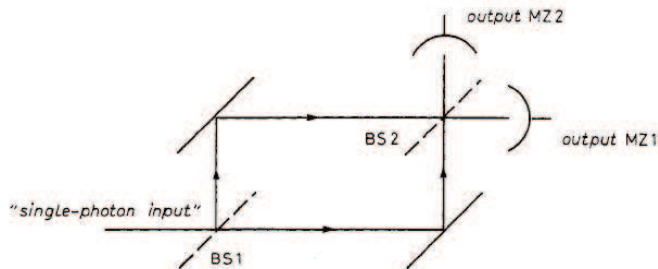
Az eredeti mérést a [3] és [4] cikkekben olvashatjuk. Lényege, hogy egy nemlineáris BBO-kristály ($\beta - \text{Ba}(\text{BO}_2)_2$) segítségével egy összefonódott (lásd [2]) fotonpárt hoztak létre, melyek közül az egyiket egy detektorhoz, a másikat egy Mach–Zehnder interferométerbe vezették. Az interferométer után egy fotonszámlálót helyeztek. Az eredeti kísérletben egy időben egyszerre csak egy foton tartózkodott az interferométerben, így az csupán önmagával volt képes interferálni. Amennyiben a rendszeren egyéb változtatást nem eszközöltek interferenciát lehetett megfigyelni, a foton útját nem lehetett meghatározni. Viszont, amikor a rendszerbe egy nyomjelölőt helyeztünk (aminek segítségével meg lehetett állapítani, hogy a foton mely úton halad) az interferencia eltűnt, amennyiben megfigyeltük a második foton polarizációját. A második detektort távolítva elérhetjük, hogy az első fotont előbb detektáljuk, minthogy meghatározhatnánk, hogy melyik résen haladt át. Ezt úgy is kivitelezhetjük, hogy a második detektor elé egy ferde polárszűrőt helyezünk. Amennyiben így megfigyeljük a foton polarizációját az interferencia továbbra sem jelenik meg, azaz a két foton között nincs kommunikáció.

Az elvégzett kísérlet sematikus rajza:



3.2. Az általunk elvégzett kísérlet

Mérésünk során, az eredeti kísérlettel azonos Mach-elrendezést használtuk melyet az alábbi ábrán láthatunk:



Az interferométer működésének lényege, hogy a lézerfényt egy féligáteresztő tükör (ennek készítése eljárását lásd a [2] könyvben) segítségével kéttéválasztottuk. A két nyalábot aztán egy újabb féligáteresztő tükör segítségével később újra egyesítjük. A végső nyalábokat egy lencse segítségével egy ernyőre vetítettük. Ha a két nyaláb teljesen párhuzamos volna, akkor nem interferenciát látnánk, hanem két pontot, ám ennek megvalósítása gyakorlatilag lehetetlen. A rendszert úgy hangoltuk be, hogy interferencia csíkok jelenjenek meg. A rendszerbe két, egymásra merőleges polárszűrőt helyezve az interferencia eltűnt. Ennek kvantumos magyarázata, hogy megjelöltük, hogy a foton melyik úton haladt, ezzel „megsemmisítettük” az interferenciát. Több foton esetén klasszikus magyarázatot is adhatunk az eseményre, miszerint két egymásra merőlegesen polarizált fénynyaláb nem képes interferenciára. Viszont ha, egy harmadik, az előbbi kettővel szöget bezáró polárszűrőt is a rendszerbe helyeztünk, akkor „kiradíroztuk” a helyjelölést, ezáltal az interferenciát helyreállítottuk. Klasszikusan magyarázva, ekkor a két foton polarizációja már nem merőleges, így képesek interferenciára.

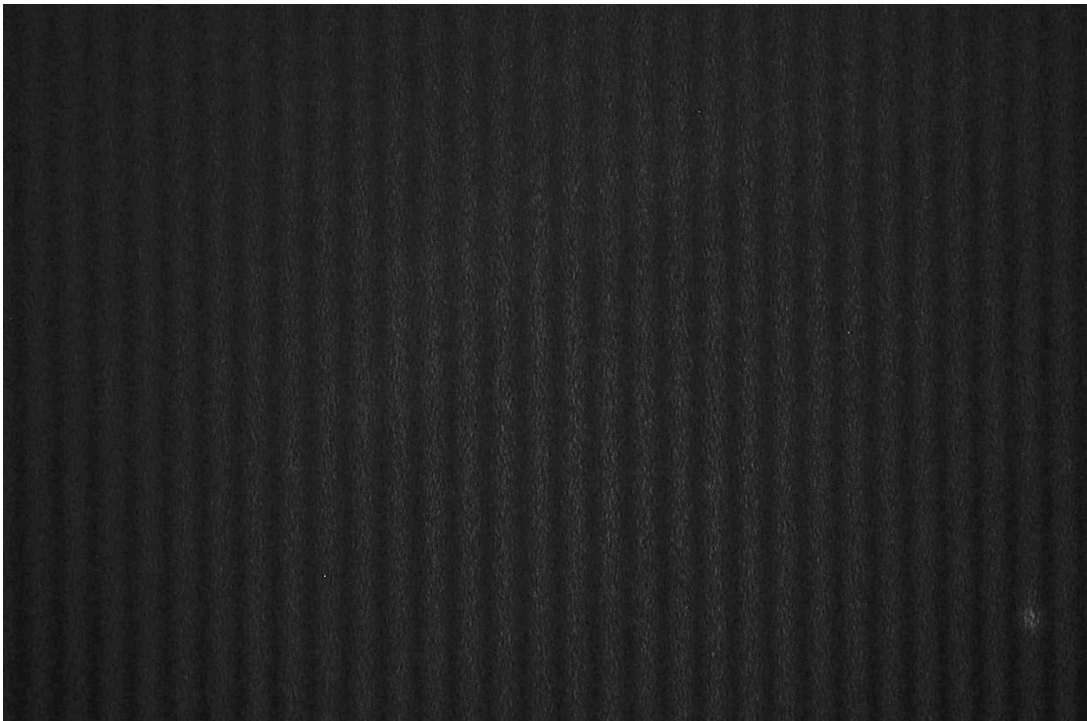
4. Mérési eredmények

A mérési eredményekről minden esetben a laborban található digitális fényképezőgéppel készítettünk képeket. A fényképezőt manuális módban használtuk, a megfelelő beállítások

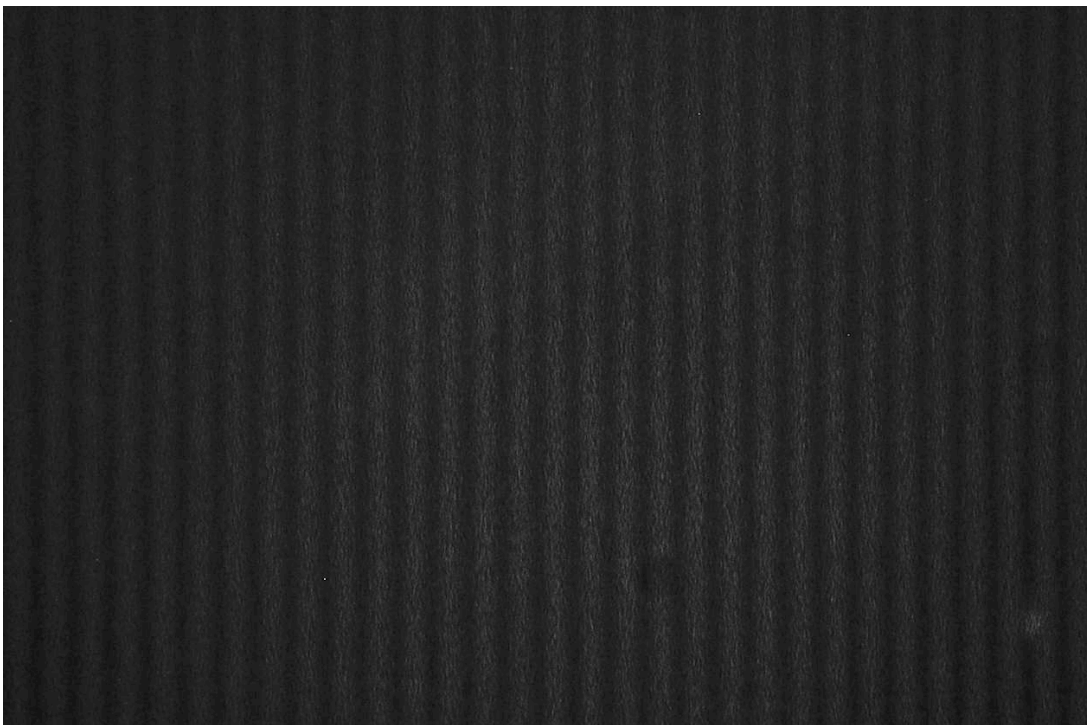
mellett. A pixel-centiméter konverziót úgy végeztük, hogy az egyik képre „ráfényképeztük” a mérőszalagot. A mért eredményekről készített fényképek Greyscale módban és beforgatva:



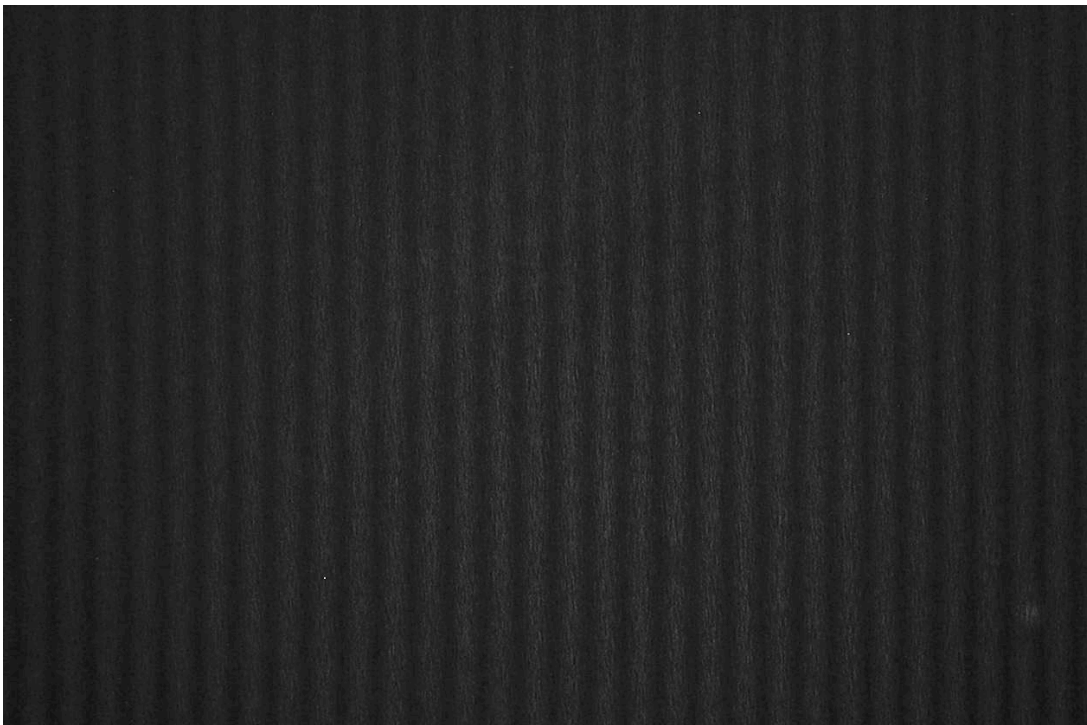
1. ábra. Mérési eredmény 0° -os polárszűrővel



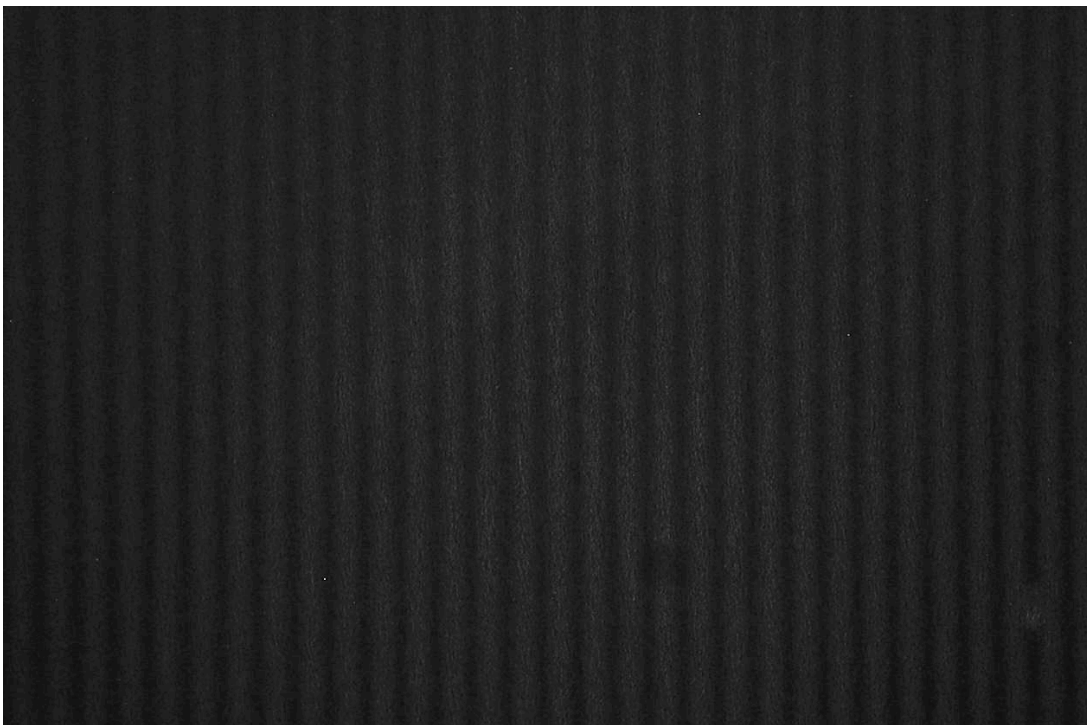
2. ábra. Mérési eredmény 5° -os polárszűrővel



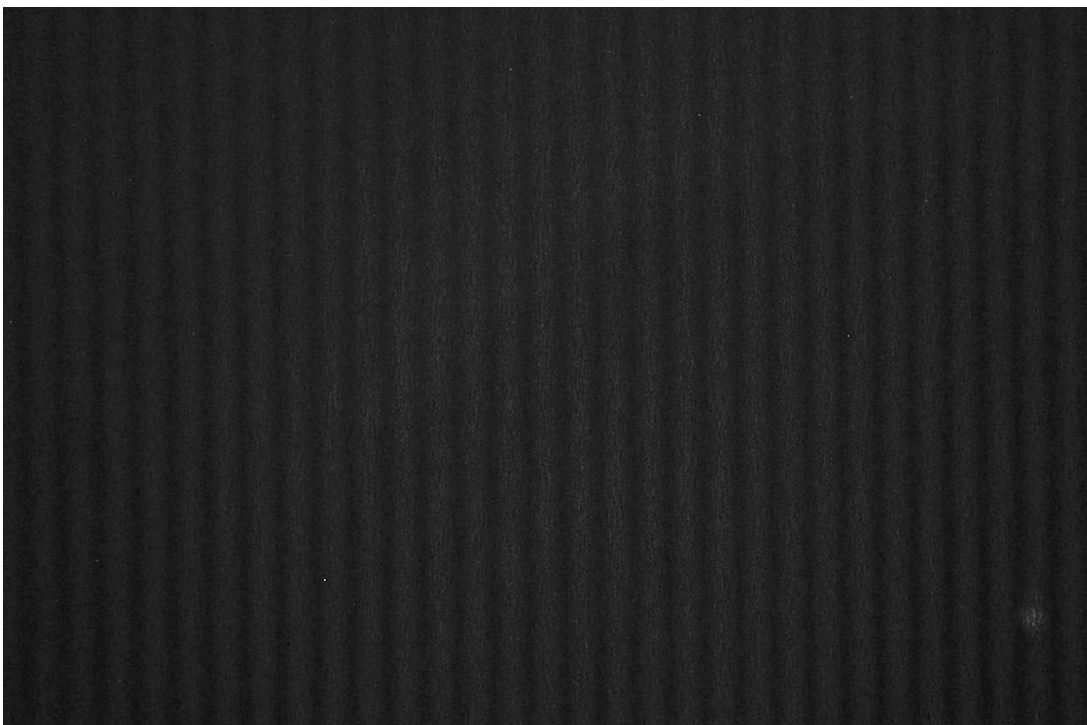
3. ábra. Mérési eredmény 10° -os polárszűrővel



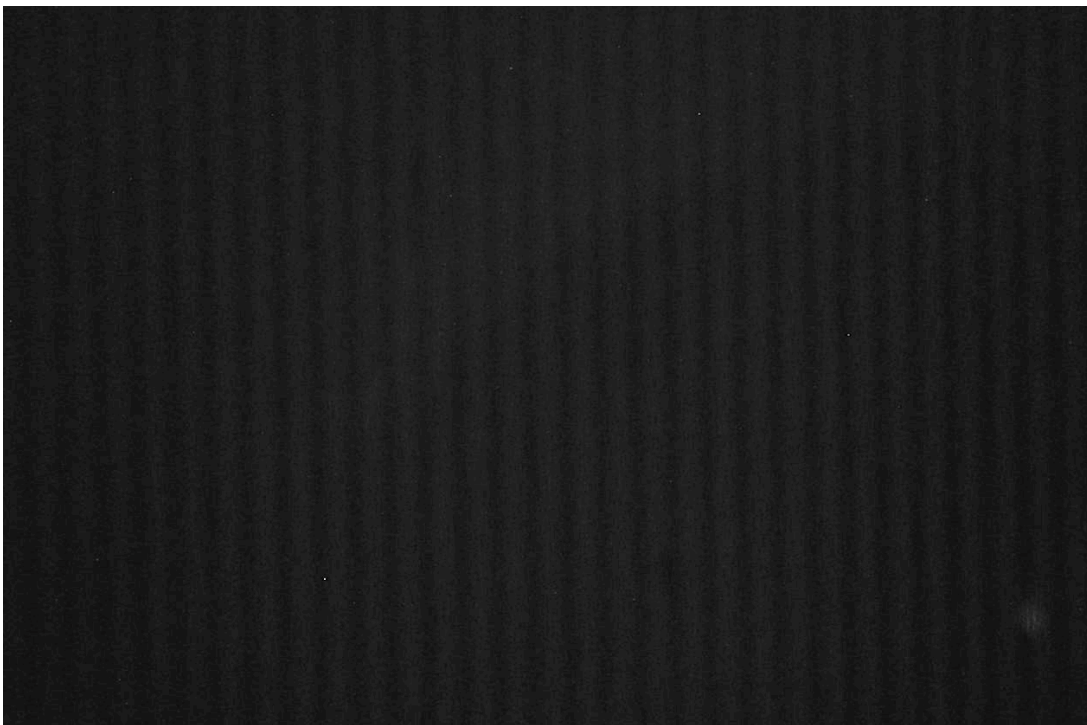
4. ábra. Mérési eredmény 15° -os polárszűrővel



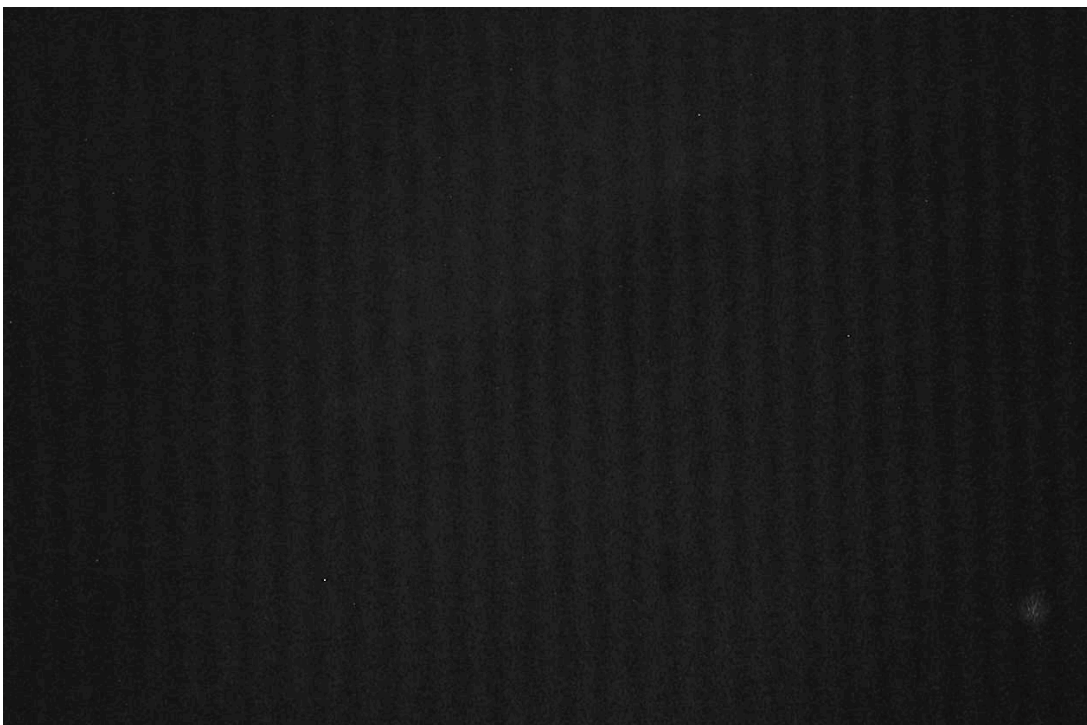
5. ábra. Mérési eredmény 20°-os polárszűrővel



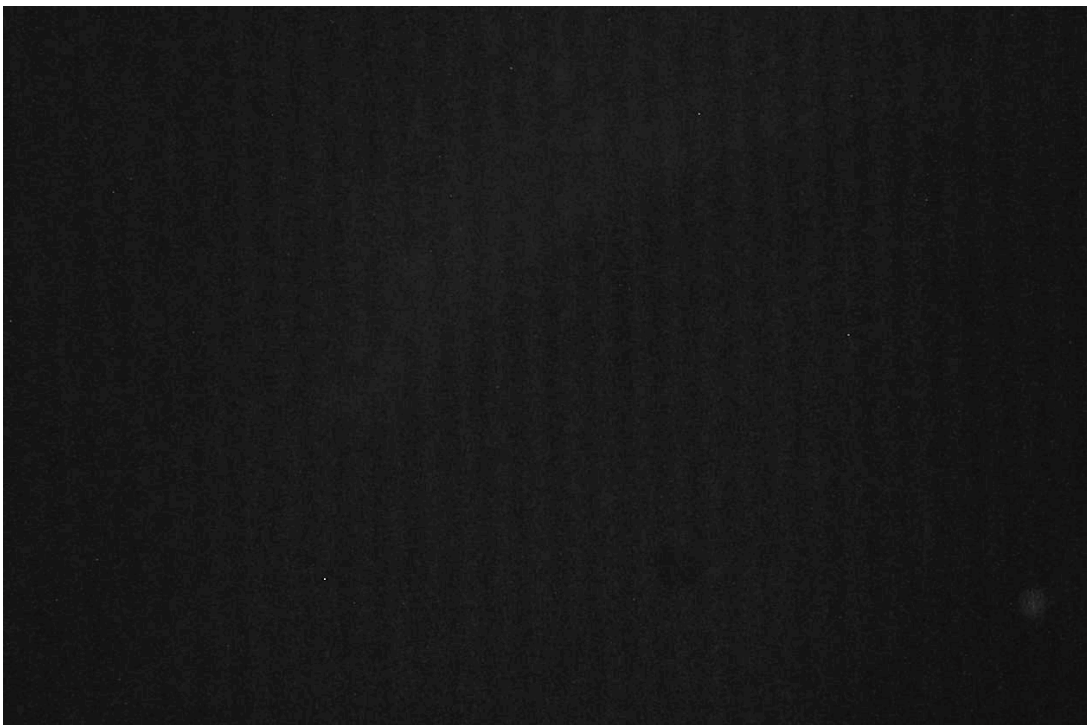
6. ábra. Mérési eredmény 25°-os polárszűrővel



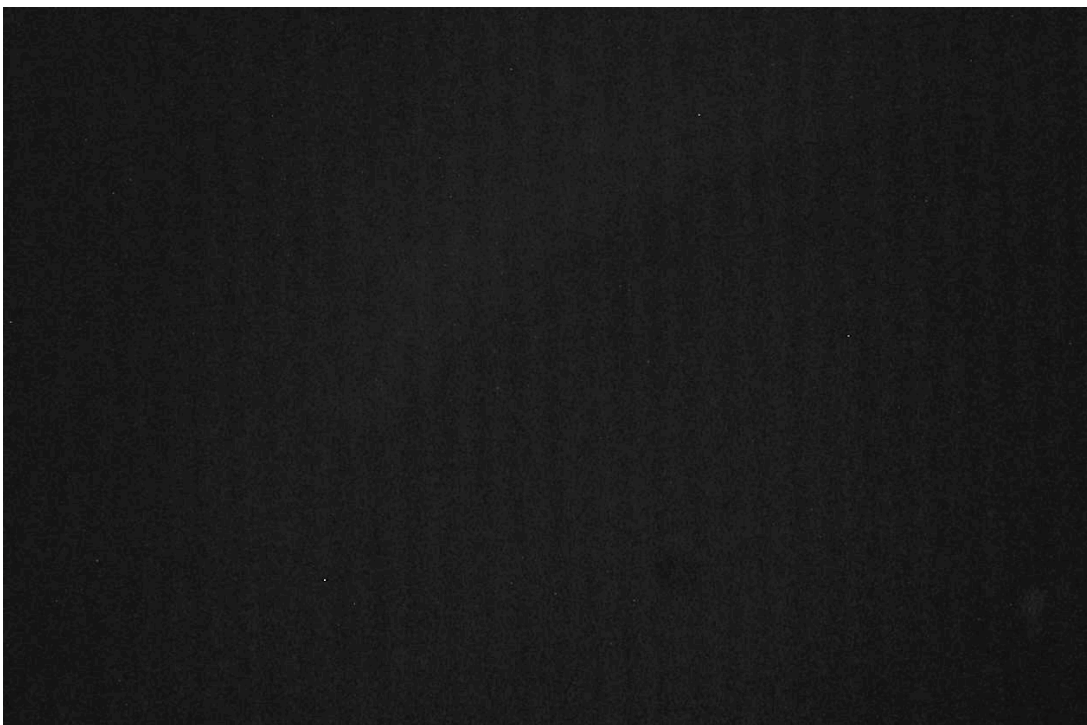
7. ábra. Mérési eredmény 30° -os polárszűrővel



8. ábra. Mérési eredmény 35° -os polárszűrővel



9. ábra. Mérési eredmény 40° -os polárszűrővel



10. ábra. Mérési eredmény 45° -os polárszűrővel

4.1. Kalibráció

A tényleges kísérlet előtt szükséges volt meghatároznunk, hogy a két kar mekkora szöget zár be. Ezt az interferenciacsíkok távolságából számíthatjuk ki. Mivel a két fénynyaláb nem pontosan párhuzamos, a lencse két különböző pontba képezi le őket. A mérési elrendezésünk ezen része megegyezik egy kétréses kísérlettel, ahol a két rés közötti távolság és az interferencia maximumok közötti távolság között az alábbi reláció áll fent [5]:

$$d \sin \vartheta = k\lambda, \quad (1)$$

ahol d a két rés távolsága, ϑ az interferenciacsík és az optikai tengely által bezárt szög, λ a fény hullámhossza és $k \in \mathbb{Z}$. Két interferenciacsík távolságát ismerve a fókusz meghatározható:

$$\frac{\lambda}{d} = \sin(\vartheta + d\vartheta) - \sin \vartheta, \quad (2)$$

ahol $d\vartheta$ a két csík szögeltérése. A két rés távolságából meghatározható a két fénysugár szöge. Mivel mérésünk során az optikai tengellyel kis szöget bezárva fényképeztünk, így használhatjuk a paraxiális közelítést [5]. Ennek értelmében minden optikai elemet egy transzfermátrixsal jellemezhetünk. Jelölje a fókusz-távolságot f , ezzel a gyűjtőlencse mátrixa:

$$\mathbf{T}_{\text{len}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

A fókuszpontig való szabad terjedés mátrixa pedig:

$$\mathbf{T}_{\text{free}} = \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

A totális terjedési mátrix ezzel:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{free}} \mathbf{T}_{\text{len}} = \begin{pmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Ezt egy y távolságból Θ szög alatt érkező fénynyalábra hattatva megkapjuk a detektált fénysugár adatait:

$$\begin{pmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Theta f \\ \Theta - \frac{y}{f} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Innen a két rés távolsága Θf , ahonnan a két fénysugár szöge a két fókuszról:

$$d = \Delta \Theta f. \quad (7)$$

Mérésünk során használt lencse fókusz-távolsága $f_l = 2.7$ mm volt, a lencse és az ernyő távolsága pedig $D = 36.4$ cm. A távolságmérés hibája $\Delta D = \pm 0.1$ cm. A mérés során készített képekről leolvastuk a csúcsok távolságát olyan mód, hogy a képeket 8 bites Greyscale-lé alakítottuk, majd egy részét kivágva az intenzitáscsúcsokra és minimumokra Gauss-görbét illesztettünk. A lézer hullámhossza ismert $\lambda = 632.8$ nm.

A kiértékelt képekből a csúcsok távolsága:

Polárszűrők szöge (°)	Csúcsok távolsága (px)	Csúcsok távolsága (cm)
0	42.3333	0.2236
5	42.5556	0.2248
10	41.5556	0.2195
15	44.3333	0.2342
20	45.1111	0.2383
25	44.1111	0.2330
30	42.8889	0.2266
35	47.3333	0.2500
40	43.0000	0.2272
45	45.2222	0.2389
átlag		0.2316

Az elméleti megfontolások alapján a réstávolság meghatározható (a legelső maximumhoz tartozó szöget $\vartheta = 0$ -nak véve):

$$\sin d\vartheta \approx \frac{0.2316}{36.4 - 0.27} = 6.41 \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

$$d = \frac{\lambda}{\sin d\vartheta} = 9.87 \cdot 10^{-3} \text{ cm}. \quad (9)$$

Innen meghatározható a két sugár által bezárt szög:

$$\Delta\Theta = \frac{d}{D - f_l} = 0.016^\circ. \quad (10)$$

4.2. Interferencia fokozatos eltüntetése

Mielőtt a tényleges kiértékelésre rátérhetnénk definiáljuk a kontrasztot az alábbi képpen:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (11)$$

Egy függőlegesen polarizált fénynyalábot egy vele α szöget bezáró polárszűrőn átengedve a következő polarizációjú nyalábot kapjuk:

$$\mathbf{E} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Egy $-\alpha$ szögűn átengedve pedig:

$$\mathbf{E} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Az intenzitás és láthatóság között a kvantummechanikában az alábbi egyenlőtlenség teljesül:

$$V^2 + I^2 \leq 1, \quad (14)$$

ahol V a láthatóság, I pedig az információ. Klasszikus hullámtannal leírva pedig:

$$I = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^2 = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1\mathbf{E}_2, \quad (15)$$

melyből az interferenciát az utolsó tag adja. Mivel a lézerünk fénye függőlegesen polarizált volt, így azt várjuk, hogy a kontraszt és a szög között az alábbi arányosság áll fent:

$$C \sim \cos^2 \alpha. \quad (16)$$

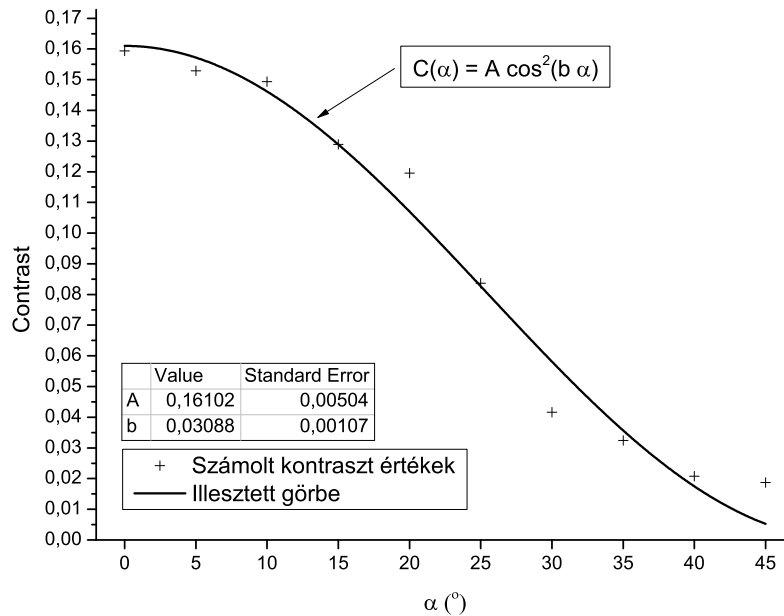
Mivel az egyes csúcsok intenzitás minimum és maximum értékei nem egyeznek, ezért az így számolt értékek közül a legnagyobbat vettük. Ezzel megkerestük a képek kontraszt-maximumait. A kiértékelést minden szögállásra elvégezve a kapott adatok:

α (°)	C
0	0.15937
5	0.15291
10	0.14932
15	0.12892
20	0.11955
25	0.08370
30	0.04160
35	0.03241
40	0.02078
45	0.01874

A fenti gondolatmenet értelmében a $C(\alpha)$ pontokra az alábbi függvényt illesztettük:

$$C(\alpha) = A \cos^2 b\alpha. \quad (17)$$

A mért pontokra illesztett görbe:



A görbe paraméterei:

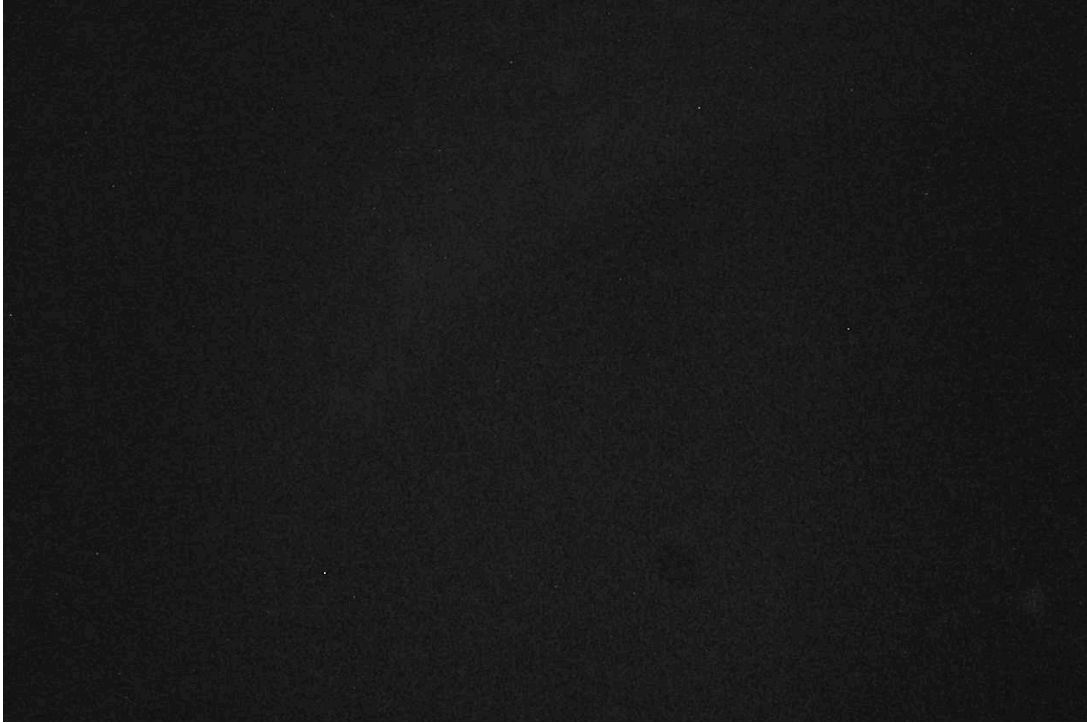
$$A = 0.161 \pm 0.005, \quad (18)$$

$$b = 0.031 \pm 0.001. \quad (19)$$

Tehát a feltevésünk helytálló volt.

4.3. Kvantumradír

Az interferencia eltűnése után a rendszerbe helyeztük a harmadik polárszűrőt is, aminek segítségével vissza tudtuk állítani az interferenciát. A harmadik polárszűrő szögét a 5 helyre állítva ismét felvettük a képeket:



11. ábra. Mérési eredmény $\beta = 0^\circ$ -os polárszűrővel



12. ábra. Mérési eredmény $\beta = 22.5^\circ$ -os polárszűrővel



13. ábra. Mérési eredmény $\beta = 45^\circ$ -os polárszűrővel



14. ábra. Mérési eredmény $\beta = -22.5^\circ$ -os polárszűrővel

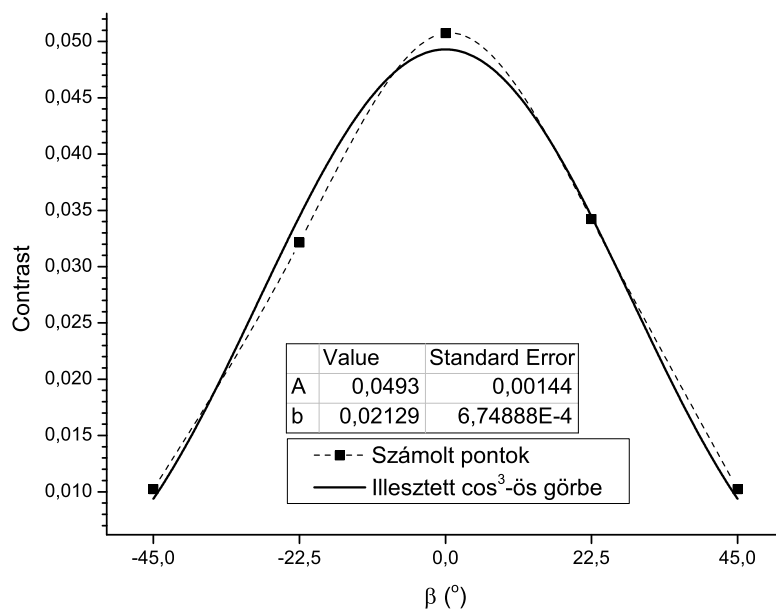


15. ábra. Mérési eredmény $\beta = -45^\circ$ -os polárszűrővel

Majd ezeknek is meghatároztuk a kontrasztmaximumait:

β (°)	C
-45	0.01024
-22.5	0.03214
0	0.05075
22.5	0.03423
45	0.01023

A mérés pontjait az alábbi grafikonon ábrázoltuk:



Látható, hogy a számolt pontok szimmetrikusan helyezkednek el az origóra, így bizonyosan egy páros függvény fogja leírni a $C(\alpha)$ függvényt. Első közelítésben egy $A \cos^n \alpha$ függvényt próbáltunk meg illeszteni, amely bár jól illeszkedett n paraméter hibája nagyságrendekkel nagyobb volt, mint maga az értéke, így addig csökkentettük n értékét, amíg a többi paraméter hibája az elvárt hibahatár alá nem csökkent. Mérésünk alapján $n = 3$ -nak adódott, így az illesztett grafikon egyenlete:

$$C(\alpha) = A \cos^3 b\alpha. \quad (20)$$

Az illesztési paraméterek és hibáik a grafikonon megtalálhatóak.

Hivatkozások

- [1] Kiadott jegyzet: <http://wigner.elte.hu/koltai/labor/parts/22qe.pdf>
- [2] Patkós András: *Bevezetés a kvantumfizikába: 6 előadás Feynman modorában*, Budapest, 2011.
- [3] B.-G. Englert, M.O. Scully and H. Walther, *Nature* (London) 351 (1991) 111
- [4] S.P. Walborn, M.O. Terra Cunha, S. Pádúa and C.H. Monken, *Phys. Rev. A* 65 (2002) 033818

- [5] Cserti József, Varga Dezső, Dávid Gyula: *Optika és relativitáselmélet előadás jegyzet*, Budapest, 2011.