

8 Übungsblatt zur Experimentalphysik IV

19. Loopholes der Aspect-Experimente

Schwachstellen der Aspect-Experimente:

1. Quelle

Die Teilchen werden durch eine Atom-Kaskade erzeugt, wobei hierdurch die Gleichzeitigkeit der Erzeugung nicht gegeben ist, jedoch die Korrelation der Polarisierung. Die Korrelation ist eine der notwendigen Bedingungen um die Bell'schen Ungleichungen zu testen. Die Photonen befinden sich durch die Kaskade im "EPR-Zustand".

2. Polarisatoren/Bauteile

Die Effizienz der Bauteile und speziell der Polarisatoren beträgt nicht 100%, d.h. es werden Teilchen aussortiert, dies führt dazu, dass der Konflikt mit den Bell'schen Ungleichungen verringert oder gar ganz verschwinden kann. Die Möglichkeit besteht jedoch auch, dass gerade diese Teilchen herausgeworfen werden, die die quantenmechanischen Bedingungen nicht erfüllen.

3. Lokalitäts-Schwachstelle

Die Detektion der Teilchen muss an verschiedenen Orten stattfinden. Hierzu werden beim Versuch die Detektoren entfernt voneinander aufgebaut. Das Problem ist, dass diese Informationen austauschen könnten wenn die Detektion der Teilchen nicht zufällig geschieht (d.h. das der Detektor während des Fluges des Teilchen zu diesem erst festlegt, welche Komponente er durchlassen wird), d.h. dass der eine Detektor dem anderen Detektor sagen könnte, in welcher Art er geschaltet ist und dadurch könnte die Messung beeinflusst werden. Man könnte dann nicht ausschließen, dass die Messung am linken Detektor von der Orientierung des rechten Detektor abhängt. Dies würde jedoch die Lokalitäts-Bedingung verletzen und somit die Bell'schen Ungleichungen ungültig werden.

4. Detektions-Schwachstelle

Die Detektion kann nur über einen bestimmten Winkel erfolgen, dies heisst, dass nicht alle erzeugten Teilchen (diese haben nicht unbedingt eine Vorzugsrichtung) detektiert werden können, was eine zusätzliche Unsicherheit in das Ergebnis des Experimentes bringt, da man nicht weiss, ob die Teilchen der nicht detektierten Richtungen nicht doch noch andere Eigenschaften zum Vorschein bringen könnten (dies erscheint jedoch eher unrealistisch, darf aber bei solch einem grundlegenden und wichtigen Experiment nicht vollkommen vernachlässigt werden). Zudem waren damals die Photomultiplier noch nicht so effizient, wodurch zusätzlich Teilchen nicht detektiert wurden. Bei Koinkidenzmessung verlor man somit noch mehr Teilchen.

Die Aspect Gruppe konnte den EPR-Zustand herstellen, wobei die Gleichzeitigkeit jedoch nicht gegeben war. Zudem kommen viele "Messfehler" durch Ungenauigkeiten der Messapparaturen in die Ergebnisse hinein (der Photonstrahl musste um einen Faktor 3 verringert werden, damit er die Schalter(AOMs) treffen konnte), der Photonenstrahl trag,

auf Grund seiner räumlichen Ausdehnung, die AOM's nicht an jeder Stelle unter dem gleichen Winkel, daher kam es nicht bei jedem Photon zu einem schalten des Schalters. Um genug Daten zu sammeln musste der Versuch zeitlich sehr lange ausgedehnt werden, wobei dies zu systematischen "drifts"/Verschiebungen kam, wodurch eine Mittelung nötig wurde. Die zweite Lokaliätbedingung (s.S.17 7.5 Timing conditions) konnte nicht beeinflusst werden, d.h. es fanden keine "wirklichen" Zufallsmessungen statt, die Filter wurden zwar verändert, jedoch nicht zufällig sondern "quasi-periodisch", dies schliesst somit also nicht die Lücke des Informationsaustausches zwischen den Filtern, da ja sobald der Filter erkannt hat, dass er "periodisch" umgeschaltet wird, diese Information transferieren könnte. Zudem bleibt auf Grund der Benutzung von "single channel polarizers" fraglich inwieweit eine faire Auswahl (fair sampling) getroffen wurde. Die Schalter waren auch nicht perfekt, da diese nicht bei jedem Teilchen schalteten und somit nur für die "geschalteten Teilchen" die Bell'schen Ungleichungen gelten.

20. Akusto-optischer Modulator (AOM)

Ein AOM besteht aus einer Flüssigkeit oder einem Kristall, der durch Schallwellen beeinflusst seinen Brechungsindex periodisch verändert und die Apparatur drumherum, die für die Erzeugung der Schallwellen verantwortlich ist. Diese Brechungsindexänderung resultiert aus einer Dichteänderung des Mediums im AOM. Da das Licht sich sehr viel schneller als die Schallwellen für die Modulation bewegt, kommt dem Licht der Brechungsindex statisch vor, womit Nebeneffekte vernachlässigt werden können, die auftreten würden, wenn der Brechungsindex sich ändern würde während das Licht das Medium durchquert. Nun tritt an diesem Medium Braggreflexion auf, womit die Strahlen auf verschiedene Polarisatoren hinter diesem gelenkt werden können und somit eine Art Schalter entsteht. Die Richtung ist von dem momentanen Brechungsindex abhängig, wobei dieser sich periodisch durch die angelegte Schallwellenmodulation ändert. Jedoch ist bei der Entstehung des Photonenpaares eine gewisse Zufälligkeit gegeben, wobei diese innerhalb einer gewissen Zeitperiode entstehen und somit wie schon in **Aufgabe 19** erwähnte eine "quasi-periodische" Schaltung entsteht, da der Schalter sich periodisch ändert, die einfallenden Photonen jedoch nicht periodisch entstehen und somit zufällig auf einen Brechungsindex treffen.

Im Bell-Test Experiment werden die AOMs benutzt, um die Lokaliätsbedingung zu erfüllen, wobei keine wirkliche Zufälligkeit hergestellt werden kann, diese würde nur durch einen quantenmechanischen Effekt erreichbar sein, diese Möglichkeit besteht jedoch heute noch nicht und zur Zeit der Aspect-Experimente existierte daher auch keine Methode um den "perfekten" Zufall zu erzeugen.

Die Frequenz beeinflusst den Brechungsindex, wobei durch diesen die Richtung des Strahles beeinflusst wird. Um eine 50/50 Strahlaufteilung zu erzielen, muss man den Brechungsindex einstellen, dies wird jedoch über die Frequenz erreicht, womit also die Schallwellenfrequenzmodulation eingestellt werden muss.

21. Bell-Zustände

(a)

Es ergeben sich die vier Bell-Zustände:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|H_1\rangle|H_2\rangle + |V_1\rangle|V_2\rangle) \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|H_1\rangle|H_2\rangle - |V_1\rangle|V_2\rangle) \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|H_1\rangle|V_2\rangle + |V_1\rangle|H_2\rangle) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|H_1\rangle|V_2\rangle - |V_1\rangle|H_2\rangle) \quad (4)$$

Für die Eigenschaften gilt, dass H horizontal und V vertikal polarisiert bedeutet, wobei sich die Indizes 1 bzw. 2 auf das jeweilige Teilchen beziehen. Jeder Bell-Zustand drückt die Korrelation der Teilchen aus und diese können jeweils nur in einem Bell-Zustand vorliegen. Es folgt z.B. wenn wir den Bell-Zustand (1) betrachten, dass wenn wir in Photonenkanal 1 eine Polarisation H detektieren, das Teilchen bei 2 auch automatisch in H vorliegen muss, da die Teilchen korreliert sind.

(b)

Wir betrachten die Bell-Zustände (1), (2), (3) und (4), für diese ergibt sich für die Einzelphoton-Messung eine Wahrscheinlichkeit im Photonenkanal 1 bzw. 2 den Zustand H bzw. V zu finden mit 50%, da wir eine Einzelphoton-Messung durchführen und die Verschränkung mit einem gepaarten Photon die Einzelmessung nicht beeinflusst. Bzw. erst, wenn wir das andere Photon detektiert hätten im jeweiligen anderen Kanal könnten wir bestimmen, ob das Photon, dass wir detektieren wollen mit 0% oder mit 100%iger Wahrscheinlichkeit im jeweiligen Zustand ankommt, da wir diese Aussage auf Grund der Bell-Zustände bzw. der Korrelation treffen könnten.

(c)

Der Bell-Zustand trägt Information über die Korrelation zwischen den Teilchen, jedoch muss man beide Teilchen auslesen, dann erhält man jedoch auch die Möglichkeit den Zustand des jeweiligen Teilchens zu bestimmen und kann dann Rückschlüsse auf die Erzeugung des Teilchens ziehen.

Im Einzel-Photon-Zustand steckt nur die Information wie das Einzelphoton polarisiert (bzw. Energie des Photons und Richtung) ist. In Verbindung mit dem Versuchsaufbau und die damit verbundene Erzeugung des Photonenpaares (z.B. PDC I bzw. PDC II, Atom-Kaskade), ist es auch möglich eine Aussage über das korrelierte Photon zu treffen.

22. PDC

Die PDC ermöglicht es die Bell-Zustände zu erzeugen, indem man bei der PDC Typ II nachdem ein Teilchen erzeugt wurde nach dem SG-Magneten vor den Detektor verschiedene Filter stellt, die dafür sorgen, dass das Teilchen seine Eigenschaften ändert. Dies geschieht durch Phasensprünge in den Filtern.

Die zwei Arten der PDC unterscheiden sich dadurch, dass bei der Typ I PDC die Korrelation der Teilchen durch gleiche Polarisation gegeben ist, während die für Typ II durch genau entgegengesetzte Polarisation gegeben ist.

Die Graphiken Fig.2 und Fig.3 zeigen die Austrittsrichtungen der durch PDC entstandenen Teilchen an, wobei die bei Typ I entstandenen Teilchen sich auf konzentrischen Kegeln um die Richtung des Pumpstrahls bewegen, während die Typ II Teilchen sich auf ellipsenförmigen sich überschneidenden Bahnen bewegen.

Der Vergleich von Fig.3 und Fig.8 zeigt, dass sich bei beiden die Bahnen der Ausbreitungsrichtungen überschneiden, jedoch die Form bei Fig.8 mehr die Form von Kreisen besitzt, als es in Fig.3 suggeriert wird.