

# 편극빛분할기를 리용한 양자얽힘상대분석기의 작용물림새

김선경, 김남철, 고명철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《현대과학기술의 빠른 발전은 기초과학의 성과에 토대하고있으며 과학기술분야에서의 자립성은 기초과학분야에서부터 시작됩니다.》(《김정일선집》 증보판 제10권 485페이지)

양자얽힘은 양자력학적계에만 고유한 비국부상관관계로서 양자정보처리분야에서 널리 리용되고있다.[1, 2] 최근시기 양자암호통신에서 측정장치에 무관계한 양자열쇠분배방안[3, 4]이 제안되어 양자열쇠분배의 안전성과 통신거리를 훨씬 늘일수 있는 가능성을 열어주고있는데 이 방안은 빛분할기에 기초한 벨상태분석기에 기초하고있다. 그러나 선행 연구들에서는 빛분할기를 리용한 벨상태해석에만 국한시키고 편극빛분할기를 리용한 얽힘상대분석방법에 대하여서는 언급한것이 적다.

론문에서는 선행연구에서 제안된 벨상태분석기와는 달리 편극빛분할기를 리용한 얽힘상대분석기의 모형을 제안하고 그 작용물림새를 해명하였다.

## 1. 편극빛분할기에 기초한 벨상태분석기

론문에서는 편극빛분할기(PBS)에 기초한 벨상태분석의 한가지 방안을 제안하였다.(그림 1) 그림 1에서 HWP는 반파장판,  $D_H$ ,  $D_V$ 는 각각 수평 및 수직편극포톤검출기이다.

편극빛분할기와 반파장판의 성질들을 리용하면 그림 1의 장치에서 양자상태의 변화를 다음과 같이 결정할수 있다.

$$\begin{aligned} |\Phi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle + |VV\rangle) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle_{12} - |VV\rangle_{12}) \xrightarrow{\text{HWP}} \\ &\xrightarrow{\text{HWP}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle_{12} - |--\rangle_{12}) \xrightarrow{\text{PBS}} -\frac{i}{\sqrt{2}}(|HV\rangle_{12} + |VH\rangle_{12}) \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 입력되는 양자상태가 벨상태  $|\Phi^+\rangle$ 일 때 항상 검출기  $D_{H1}$ ,  $D_{V2}$ 가 동시에 응답하거나 검출기  $D_{V1}$ ,  $D_{H2}$ 가 동시에 응답하는것을 관측할수 있다. 마찬가지로 다음식을 쓸수 있다.

$$\begin{aligned} |\Phi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle - |VV\rangle) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle_{12} + |VV\rangle_{12}) \xrightarrow{\text{HWP}} \\ &\xrightarrow{\text{HWP}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle_{12} + |--\rangle_{12}) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle_{12} - |VV\rangle_{12}) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로부터 입력되는 양자상태가 벨상태  $|\Phi^-\rangle$ 일 때 항상 검출기  $D_{H1}$ ,  $D_{H2}$ 가 동시에 응답하거나 검출기  $D_{V1}$ ,  $D_{V2}$ 가 동시에 응답한다는것을 알수 있다.

류사한 방법으로 벨상태들에 대하여 다음식을 얻을수 있다.

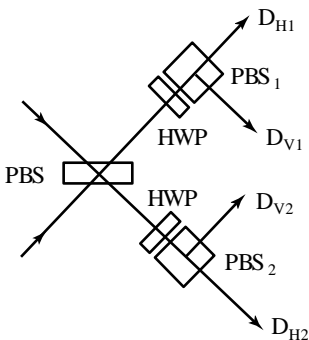


그림 1. 편극빛분할기에 기초한 벨상태분석기모형

$$\begin{aligned}
|\Psi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle + |VH\rangle) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{i}{\sqrt{2}}(|VH\rangle_{11} + |HV\rangle_{22}) \xrightarrow{\text{HWP}} \\
&\xrightarrow{\text{HWP}} \frac{i}{\sqrt{2}}(|-+\rangle_{11} + |+-\rangle_{22}) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{i}{2\sqrt{2}}(|HH\rangle_{11} + |HH\rangle_{22} + |VV\rangle_{11} + |VV\rangle_{22}) = \\
&= \frac{i}{2}(|2\rangle_{H1} + |2\rangle_{H2} + |2\rangle_{V1} + |2\rangle_{V2}) \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
|\Psi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle - |VH\rangle) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{i}{\sqrt{2}}(|HV\rangle_{22} - |VH\rangle_{11}) \xrightarrow{\text{HWP}} \\
&\xrightarrow{\text{HWP}} \frac{i}{\sqrt{2}}(|+-\rangle_{22} - |-+\rangle_{11}) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{i}{2\sqrt{2}}(|HH\rangle_{22} - |HH\rangle_{11} - |VV\rangle_{11} + |VV\rangle_{22}) = \\
&= \frac{i}{2}(|2\rangle_{H2} - |2\rangle_{H1} - |2\rangle_{V1} + |2\rangle_{V2}) \quad (4)
\end{aligned}$$

비록 2개의 포톤이 같은 하나의 검출기에 도달하지만 동시응답을 관찰할수 없으므로 그림 1에 제안한 장치를 통하여서는 상태  $|\Psi^+\rangle, |\Psi^-\rangle$ 를 구별할수 없다.

## 2. 편극빛분할기에 기초한 3립자GHZ얽힘상태분석기

3립자GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger)얽힘상태분석기모형을 그림 2와 같이 구성할 수 있다. 그림 2에서  $a, b, c$ 는 각각 입력모드들을 나타낸다.

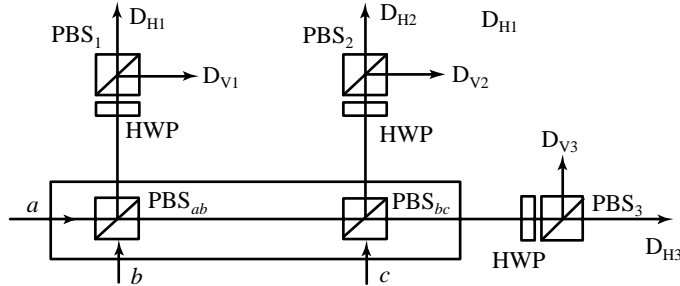


그림 2. 편극빛분할기에 기초한 3립자GHZ얽힘상태분석기모형

GHZ얽힘상태에 대하여 다음과 같은 8가지 얽힘상태가 가능하게 된다.

$$\begin{aligned}
|\Phi_0^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|HHH\rangle \pm |VVV\rangle), \quad |\Psi_1^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|VHH\rangle \pm |HVH\rangle), \\
|\Psi_2^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|HVH\rangle \pm |VHV\rangle), \quad |\Psi_3^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HHV\rangle \pm |VVH\rangle) \quad (5)
\end{aligned}$$

편극빛분할기와 반파장판의 성질을 리용하여 다음식을 쓸수 있다.

$$\begin{aligned}
|\Phi_0^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|HHH\rangle + |VVV\rangle) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|HHH\rangle_{123} + |VVV\rangle_{123}) \xrightarrow{\text{HWP}} \\
&\xrightarrow{\text{HWP}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|+++ \rangle_{123} + |-- - \rangle_{123}) \xrightarrow{\text{PBS}} \\
&\xrightarrow{\text{PBS}} \frac{1}{2}(|HHH\rangle_{123} - |HVH\rangle_{123} - |VHV\rangle_{123} - |VVH\rangle_{123}) \quad (6)
\end{aligned}$$

따라서 입력량자상태  $|\Phi_0^+\rangle$ 에 대하여 항상 검출기  $D_{H1}, D_{H2}$ 와  $D_{H3}$  또는  $D_{H1}, D_{V2}$ 와  $D_{V3}$ 이,  $D_{V1}, D_{H2}$ 와  $D_{V3}$  또는  $D_{V1}, D_{V2}$ 와  $D_{H3}$ 이 각각 동시에 응답하는것을 관찰할 수 있다. 류사한 방법으로 다음식을 얻을수 있다.

$$\begin{aligned} |\Phi_0^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|HHH\rangle - |VVV\rangle) \xrightarrow{\text{PBS}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|HHH\rangle_{123} - |VVV\rangle_{123}) \xrightarrow{\text{HWP}} \\ &\xrightarrow{\text{HWP}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|+++ \rangle_{123} - |--- \rangle_{123}) \xrightarrow{\text{PBS}} \\ &\xrightarrow{\text{PBS}} -\frac{i}{2}(|HVV\rangle_{123} + |HHV\rangle_{123} + |VHH\rangle_{123} - |VVV\rangle_{123}) \end{aligned} \quad (7)$$

때문에 입력량자상태  $|\Phi_0^-\rangle$ 에 대하여 항상 검출기  $D_{V1}, D_{V2}$ 와  $D_{V3}$  또는  $D_{H1}, D_{H2}$ 와  $D_{V3}$ 이,  $D_{H1}, D_{V2}$ 와  $D_{H3}$  또는  $D_{V1}, D_{H2}$ 와  $D_{H3}$ 이 각각 동시에 응답하는것을 관찰할 수 있다.

## 맺 는 말

선형광학요소인 편극빔분할기를 리용한 양자얽힘상태분석기의 모형들을 제안하고 그 작용물림새를 양자론적으로 해명하였다. 얻은 결과들은 양자얽힘에 기초한 양자계산 및 양자통신 등 양자정보처리에 적용할수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. A. Nielsen et al.; Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge University Press, 16~18, 25~28, 2002.
- [2] J. Bell; Physics, 1, 195, 1964.
- [3] H. K. Lo et al.; Phys. Rev. Lett., 108, 13, 130503, 2012.
- [4] Y. H. Zhou et al.; Phys. Rev., A 93, 4, 042324, 2016.

주체110(2021)년 3월 5일 원고접수

## Working Mechanism of Quantum Entanglement Analyzer Based on Polarization Beam Splitters

*Kim Son Gyong, Kim Nam Chol and Ko Myong Chol*

In this paper, we proposed models of two-particle and three-particle entanglement analyzer based on the quantum mechanical analysis of polarization beam splitter and explained the working mechanism of it. The entanglement analyzer proposed in this paper could be applied to quantum information processing, such as quantum computing and quantum communication, based on quantum entanglement.

Keywords: quantum entanglement, beam splitter, analyzer, Bell's state