양자론의 코펜하겐 해석에 대한 새로운 연구 경향

DOI: 10.3938/PhiT.22.018

권 오 대

New Trends in Studies of the Copenhagen Interpretation of Quantum Theory

O'Dae KWON

Classical physical systems evolve in time in phase space along trajectories with well-defined observables of position and momentum with unlimited precision. However, quantum-mechanical systems are not subject to such rules, leaving the problem of a 'non-commuting observable' situation, for instance. Because of this, the famous historic 1927 arguments between Einstein and Bohr arose. Hence, the Copenhagen interpretation was born in the Bohr group, leading to Heisenberg's uncertainty relations, which were then widely accepted as the major part of the nature of quantum physics. Nevertheless, minor activities continued among unsatisfied scholars led by Einstein, de Broglie, Bohm, and Bell, and those which activities have recently been receiving attention in terms of possible quantum trajectory experiments.

서론: 양자 목장의 결투

‘알베르트 아인슈타인에게. 이론물리에 공헌함. 특히 광전효과를 발견한 업적을 위하여.’

이상은 1922년 아인슈타인에게 노벨상 수여 시 언명된 것이다. 이 언명은 역사적 과소평가일 뿐만 아니라 당시 물리계가 가졌던 공감대가 어떤 것이었는지를 정확하게 나타낸다.

저자약력

권오대 교수는 미국 Rice대학교 이학박사(1978)로서, 미 Cornell대학교/Dow 연구소(1978-86)를 거쳐, 현재 포항공대 명예교수(1986-)로 있다. 포항공대 재직 중 AT&T Bell Lab.(1993-94), UCLA를 방문(2000-2001)하였다. (odkwon@postech.ac.kr)

1905년 그 유명한 3개의 논문들을 발표한 아인슈타인은 광양자(light quanta) 개념으로 자유공간 맥스웰 방정식을 감히 손 보려했던 것인데, 맥스웰은 누구나가 다 잘 안다고 생각하여 시비가 많이 일었다. 십수 년이 넘도록 아인슈타인의 광양자 개념을 전혀 수용하지 않았기에 위 수상식 언명에서도 아예 무시되었다.

플랑크의 1900년 12월 양자논문 발표 후 아인슈타인의 1905년 ‘3월 논문’과 이후 그의 ‘광양자(light quanta) 가설’이 나올 때까지 5년간 양자론이라고 생겨난 것은 아무것도 없었다. 복사법칙의 ‘플랑크 공식’이 1900년에 나왔지만 1905년까지는 그건 그냥 실험데이터들을 잘 꿰어 맞춘 것이지, 그 이상도 이하도 아니라는 인식이 지배하였다. 광양자에 관한 아인슈타인 ‘3월 논문’의 첫머리 제목은 ‘빛의 생성과 변환에 관한 개략적 시각’,^[1] 즉 논문의 양자론이 ‘개략적’이란 말로 잠정적인 한계를 가진다면서 그는 신중하였다.

플랑크의 유도과정이 불완전함을 말했던 아인슈타인의 3월 양자론 논문은 ‘흑체복사의 법칙과 관련된 난점들에 관하여’라는 섹션으로 시작하는데, 여기서 그는 이 불완전성들에 날카로운 분석의 칼날을 들이대고 있다. 1905년 3월 아인슈타인의 치밀한 분석과 ‘광양자 가설’이 이렇게 등장하며 비로소 양자론의 먼동이 트기 시작하였다. 그때도 단지 두어 명의 학자들만 고전물리학의 총체적 위기의 순간을 불현듯 깨달았다.

‘이러한 극단적 상황에서는 고전적 군배의 법칙이 무효임을 수용해야 한다.’

레이리는 일반 공식들의 실패를 이렇게 인정했다. 당시 선두 학자인 플랑크가 1907년 아인슈타인에게 처음 쓴 편지이다. ‘나는 진공 속 액션에 대한 (광)양자를 추구하지는 않고, 광의 흡수와 발광이 발생하는 곳 [즉 물질]에 주로 관심을 갖지요. 허공에서 일어나는 일은 맥스웰 방정식이 엄밀하게 기

REFERENCES

- [1] On a heuristic point of view concerning the generation and conversion of light.

술한다는 것이 내 생각이지요.’

플랑크 편지 이후 10여 년 이상 코너에 몰려 조용하던 아인슈타인의 광양자설에 갑자기 아래와 같은 사건들이 터졌다. 그런 10년간 프랑스 전통귀족 가문의 루이 드브로이(Louis de Broglie)가 새로운 생각을 좇아갔다. 아버지를 여윈 그는 1906년 나이 많은 형 Maurice de Broglie가 보낸 학교에서 프랑스어, 역사, 물리, 철학을 거쳐 수학에 빠지며 푸앵카레의 강의들도 들었다. 그러다가 제1회 솔베이(Solvay) 컨퍼런스 보고서에서 양자론을 배우고 물리학에 의욕이 솟았다. 하지만 1차 대전이 터져 강제 징집되었다. 형이 힘을 써서 파리의 에펠탑 바닥에 주둔한 무선국에 배속되었다. 종전이 되어 형의 개인 창고(garage) 랩에서 X레이와 광전효과 실험을 했다.

드브로이는 훗날 썼다.

‘(1923년 당시) 혼자 명상과 성찰을 하던 중 갑자기 아이디어가 솟았다.··· 1905년 아인슈타인이 발견한 것은 일반화되어야 한다. 모든 물질에, 특히 전자로 확장해야 한다.’

‘파도와 물분자들을 보라. (조금은 어긋난 비유이다.) 모든 입자들과 모든 파동은 둘 다 섞인 거야! 단지 물질파의 파장은 너무 작으니까 거시 세계에 나타나지 않아. 원자세계에서만 나타나는 거지!’

(1917년 아인슈타인이 쓴 유도방출 논문도 만난다. 여기에 입자와 파동 개념이 혼재하고 있다.) 드브로이는 파동-입자 이중성으로 박사학위논문을 완성하여 1924년 제출한다.

운동방정식, 자성체이론 등으로 당시 프랑스의 대표학자였던 논문 지도교수 랑주뱅은, 드브로이의 논문이 무척 기발한데 너무 저돌적인 개념이라 난감해서, 가까운 친구 아인슈타인에게 사본을 보냈다.

‘요지경이 된 물리의 쥐구멍에 별들 날 있네!’

아인슈타인이 왼쪽 무릎을 탁치며 한 말이다.

‘가려둔 장막의 한쪽을 열어젖히는구나!’

아인슈타인이 오른쪽 무릎을 탁치며 한 말이다. 그렇게 드브로이는 박사가 되었다. (학위논문이 1925년 물리학연보 AdP에 100페이지 논문으로 게재된다.) 그제 모리스의 동생으로만 알려졌던 무명의 드브로이가 일약 스타덤에 올랐다. 아인슈타인과 대척점에 원자 사단을 일궈가며 찬란하던 보어가 멧쩍어졌다. 자기의 방정식에 보른-보어-하이젠베르크가 확률론적 해석을 가하는 것에 불만이던 슈뢰딩거는 환영하였다.

1911년 제1차 솔베이학회에서 젊은 아인슈타인은 시니어들 그룹의 변방에 서서 기념촬영을 하였다. 1927년 제5차 솔베이 학회에서 아인슈타인은 중심인물로 부상하여 한가운데 앉

아서 기념촬영을 하였다.

Solvay conference 1927. (이 해의 솔베이 컨퍼런스는 아인슈타인-보어 논쟁이 주요 의제였다. 양자론의 대가들이 다 모였다. 앞줄 왼쪽에서 2번째는 플랑크, 다음다음이 아인슈타인과 랑주뱅, 아인슈타인 뒤에 디랙, 콤프턴, 드브로이, 보른, 보어, 그 뒷줄에는 슈뢰딩거, 다음다음이 파울리, 하이젠베르크 등이다.)

브뤼셀의 제5차 솔베이 학회에서 상기 학자들의 최대관심사는 이것이었다. 아인슈타인은 양자역학이 시공간 인과율(causality)을 포기하는 것에 큰 우려를 나타냈다. 아인슈타인과 달리 보어는 보른의 확률론 해석을 거둔다. 보른은 보어 그룹과 이미 상당히 밀착되었던 때이다.

‘신은 주사위를 던지지 않지요. (God does not play dice.)’

‘신더러 이래라 저래라 하지 마시오. (Stop telling God what to do.)^[2]

상대론과 함께 현대물리의 중심축을 이룬 양자론은 1920년대 상기한 대로의 혼란기를 거치며 아인슈타인의 EPR 패러독스 논문이 나왔어도 코펜하겐 해석의 경향에 변화를 몰고 오지는 못하였으나, 그의 여생은 온통 양자론에 치우쳐 있었다.^[3]

파이스(A. Pais, 1918-2000)는 암스테르담 출신으로 1941년 우트레흐트에서 박사를 마친 후 2차세계대전에서 살아남았다. 그는 보어에게 먼저 갔다가 1946년 9월 프린스턴으로 갔다. 그 후 약 8년간 귀갓길에 아인슈타인을 동행하곤 한 것이 1주에 한두 번 꼴이었다. 아인슈타인과 나누던 토론만을 정리하면, 그는 통계물리 주장자이면서 이 분야에는 관심을 켜다.

REFERENCES

[2] O'Dae Kwon, *Einstein Haus* (Sae-Gil Publ. Co., 2011).

[3] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).

상대론을 거론할 경우 그는 중력과 전자기의 통일 얘기를 했고, 한 번은 미분기하가 더 이상 도움이 안 될 수 있겠다고 말하기도 했다. 대부분 양자물리를 토론했다. 아인슈타인은 양자론을 고찰하는 것에는 끝이 없었다. 현재 주도적인 양자역학 흐름이 최후 이론이 아닐 수 있음을 견지하고, 현재의 돌아가는 상황에 반대적 입장을 은근히 나타내곤 하였다.^[4]

그러한 마이너리티 양자론 그룹의 수장 아인슈타인의 움직임은 거의 잊혀져갔다. ‘거의 잊혀진’ 나머지의 몫을 봄이 맡았다. 봄(David J. Bohm, 1917-1992)은 헝가리계 유대인으로 미국으로 건너와 여러 대학을 거쳐 U.C. 버클리의 오픈하이머에게서 박사과정을 밟는다. 그의 특이한 경력을 요약하면, 학위 후 프린스턴 물리학과에 재직하던 봄은 매카시즘 회오리로 구속되고 2년 후 1951년 5월에 풀려났다. 그러나 프린스턴 대학은 이미 그를 정직시킨 터였다. 동료들과 아인슈타인이 그를 구명하려 하였으나 대학이 허가하지 않아서 봄은 브라질 상파울로 대학으로 갔다가, 이스라엘을 거쳐 영국으로 옮겨 정착, 1992년 별세하였다.

봄은 정전적(orthodox) 양자론, 즉 코펜하겐 방식을 탈피, ‘비편재성 숨은 변수(non-local hidden variable)’의 결정론적 이론(de Broglie-Bohm theory)을 수립한다.^[5] 그 이론은 비결정론적 결과와도 완전히 합치된다. 그의 이론과 아인슈타인의 EPR론이 결국 J. S. Bell의 부등식 이론의 토대가 되었다. 이런 토대의 기초 연구 결과는 부정적이나 모두 동의하는 결론은 아직 멀다.

이중슬릿 실험의 양자입자 궤적

2000년대 들어서 관련 연구들이 조금씩 보고되고 있다. 그 중 캐나다 그룹의 활동을 소개하여 본다. S. Kocsis *et al.*은 최근 Science지에 양자점 싱글포톤(single photon, 단일광자) 광원으로 Young의 이중슬릿(double-slit) 실험을 ‘약한 측정(weak measurement)’ 법으로 수행한 결과를 보고하였다.^[6]

입자형 궤적과 파동형 간섭은 ‘상보적(complementary)’이고 하이젠베르크의 불확정성원리는 양자입자의 위치와 운동량

Fig. 1. Experimental setup for measuring the average photon trajectories. Single photons from an InGaAs quantum dot are split on a 50:50 beam splitter and then outcoupled from two collimated fiber couplers that act as double slits. A polarizer prepares the photons with a diagonal polarization $|D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle)$. Quarter waveplates(QWP) and half waveplates(HWP) before the polarizer allow the number of photons passing through each slit to be varied. The weak measurement is performed by using a 0.7-mm-thick piece of calcite with its optic axis at 42° in the x - z plane that rotates the polarization state to $\frac{1}{\sqrt{2}}(e^{-i\varphi/2}|H\rangle + e^{i\varphi/2}|V\rangle)$. A QWP and a beam displacer are used to measure the polarization of the photons in the circular basis, allowing the weak momentum value k_x to be extracted. A cooled CCD measures the final x position of the photons. Lenses L1, L2, and L3 allow different imaging planes to be measured. The polarization states of the photons are represented on the Poincaré sphere, where the six compass points correspond to the polarization states $|H\rangle$, $|V\rangle$, $|D\rangle$, $|A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle - |V\rangle)$, $|L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + i|V\rangle)$, and $|R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle - i|V\rangle)$.

(momentum) (또는 속도)을 동시에 얻어 궤적을 알아내는 것을 불허한다. 소위 코펜하겐의 해석이 지시하는 바이다.

현 실험은 싱글포톤들의 집합(ensemble)을 이중슬릿 간섭계에 보내면서 포톤마다 ‘약한 측정’ 실험을 수행하며 운동량에 관한 소량의 정보를 획득[평균치 획득]한 후, 곧이어 특정 위치에 도달한 후기선택(post-selected) 부분집합(subensemble) 포톤들에 ‘강한 측정’을 수행한 것이다. [Fig. 2 ‘약한 측정’법의 설명은 본 특집의 다른 논문에서 더욱 상세하게 제공된다.] 파이버 커플러로 싱글포톤들을 50:50 나눈 것을 QWP[1/4] HWP[1/2] 판들을 써서 광원의 세기를 조절하며, ‘약한 측정’은 0.7 mm 두께의 방해석(calcite) 판으로 편광의 변화를 알아냄으로써 해당 포톤의 운동량을 알아낸다. 후속되는 ‘강한 측정’까지 다수의 포톤 집합에 반복 수행함을 모두 종합함으로써, 한 영상면의 특정 위치와 관련된 평균 운동량을 얻게 된다. 이런 측정들을 여러 영상면에 걸쳐 다량 수행함으로써 그 구간에 걸친 궤적을 재현해낸다. 이러한 과정에서 ‘약한 측정’ 실험은 간섭계 안의 수많은 입자들의 거동을 기술할 수

REFERENCES

- [4] A. Pais, *Subtle is the Lord* (Oxford University Press, 1982).
- [5] D. Bohm and B. J. Hiley, *The Undivided Universe* (Routledge, 1993).
- [6] S. Kocsis *et al.*, *Science* **332**, 1170 (2011).

Fig. 2. Measured intensities (photon counts) of the two circular polarization components of $|\Psi\rangle$, measured on the CCD screen (red and blue curves), as well as the weak momentum values calculated from these intensities (black) for imaging planes at (A) $z=3.2$ m, (B) $z=4.5$ m, (C) $z=5.6$ m, and (D) $z=7.7$ m. The red and blue data points are the intensity data with constant background subtracted. The errors for the momentum values were calculated by simulating the effect of Poissonian noise in the photon counts. The magenta curve shows momentum values obtained from enforcing probability density conservation between adjacent z planes. Because of the coarse-grained averaging over three imaging planes, the probability-conserving momentum values are not as sensitive as the measured weak momentum values to highly localized regions in the pattern with steep momentum gradients.

있게 한다.

위에서 싱글포톤 광원은 수직형 반도체레이저 공진기 GaAs/AlGaAs계의 활성층에 InGaAs 양자점(quantum dot)들을 임베드시킨 구조로서 액화 헬륨의 극저온에서 구동한다. 양자점 광원은 810 nm CW 광원으로 펌핑되고, 943 nm 파장의 싱글포톤들은 50:50으로 양분한 Gaussian 광원으로 갈라진다. 이 쌍둥이 광원은 4.69 mm 떨어져 위치하고 광원 빔의

Fig. 3. The reconstructed average trajectories of an ensemble of single photons in the double-slit apparatus. The trajectories are reconstructed over the range 2.75 ± 0.05 to 8.2 ± 0.1 m by using the momentum data (black points in Fig. 2) from 41 imaging planes. Here, 80 trajectories are shown. To reconstruct a set of trajectories, we determined the weak momentum values for the transverse x positions at the initial plane. On the basis of this initial position and momentum information, the x position on the subsequent imaging plane that each trajectory lands is calculated, and the measured weak momentum value k_x at this point found. This process is repeated until the final imaging plane is reached and the trajectories are traced out. If a trajectory lands on a point that is not the center of a pixel, then a cubic spline interpolation between neighboring momentum values is used.

Fig. 4. The trajectories from Fig. 3 plotted on top of the measured probability density distribution. Even though the trajectories were reconstructed by using only local knowledge, they reproduce the global propagation behavior of the interference pattern.

허리너비는 0.068 mm이다.

0.7 mm 방해석 판은 광축이 x - z 면상 42도만큼 z 축에서 기울어져 있는데, 소량의 복굴절(birefringence)의 위상편이가 k_x 성분으로 존재하며, 선형 편광의 입사광을 미약한 타원 편광으로 변환시킨다. 이를 측정함으로써 포톤의 운동량 k_x 값을

Fig. 5. [top left figure in grey] The quantum potential for two Gaussian slits viewed from the screen (Ref. 5). [bottom right figure in grey] Cross section of the quantum potential at a distance of 18 cm from the slits: $y = (-1.00 \sim +1.00 \times 10^{-4})$. The 6 figures inbetween are plots made for distances of 0.05 - 0.5 - 1.5 - 10 - 15 - 25 cm, respectively moving upward from bottom in screw fashion.

얻어낸다. 단 한 번의 측정은 결정적 답을 주지 못하고 측정 환경에도 영향을 끼치지 못하지만, 다량의 싱글포톤들을 측정하여 유의미한 운동량 평균값을 추출할 수 있고 Fig. 2와 같은 주요 결과를 얻게 된다.

궤적의 경로와 방해석 판의 두 개의 편광 굴절률에 따라 상이하다. 포톤의 회절각의 퍼짐은 방해석을 통과한다고 해서 특이한 변화를 보이지 않으므로, 복굴절 위상편이 값들과 포톤의 운동량 값들이 비례하는 것으로 근사할 수 있게 된다. 포톤들은 냉각 중인 CCD 스크린으로, 노출시간은 15초로 하여 수직으로 분산되어 있는 간섭무늬들을 얻는다. 각 노출시간 간격마다 약 31,000개의 포톤들을 포획하였다. 포톤 위치들은 횡축인 x 축으로 26마이크론의 픽셀 폭만큼 정밀도를 가지며, 포톤들이 간섭계 스크린으로 전파가 진행되는 구간 $z = 3.2$ m, 4.5 m, 5.6 m, 7.7 m의 각 거리의 영상판에서 도출된 실험 값들을 계산결과에 대비시킨 것이 Fig. 2에 정리되었다. 그러한 측정 영상들을 다량으로 축적함으로써 약한 측정값의 포톤 궤적들을 재구성할 수 있었다.

모든 포톤들이 이중슬릿 실험으로 재구성한 궤적들을 정확하게 가는 것이 아님을 강조해야겠다. 양자입자란 잘 정의된 개념이 아니다. 그보다는, 관측되는 최종 위치에 걸맞은 '약한' 운동량들이 기록되는 포톤 집합의 평균 궤적을 나타내고 있다. 유속에서 보여지는 흐름의 중심 유선과 흡사하다 하겠다.

한쪽 슬릿에서 나온 궤적들은 중심선을 넘어 반대편 간섭무늬 쪽으로 넘어가지 않았다. 밝은 프린지(fringe) 모서리의 궤적들은 보다 중심의 밝은 프린지로 넘어가는 경향이 있었다. 간섭무늬의 세기 분포(intensity distribution)가 그렇게 만들어졌다. 프린지들은 어두운 프린지를 넘어설 때 각도가 더 심하게 비틀렸다. 이중슬릿 실험에서 간섭무늬의 추이는 측정된 영상판들의 간격보다 훨씬 긴 거리에서 일어났다. 우리가 관측한 궤적들은 이러한 간섭무늬 추이를 정확하게 따라갔다. 이 정확도가 흠이 생길 수 있는 곳은 어두운 프린지를 지날 경우가 된다.

간섭무늬 세기의 분포에 궤적들을 덧씌운(overlay) 결과가 Fig. 4이다. 궤적들이 전체적인 간섭무늬 분포를 잘 나타내고 있다. 재구성된 궤적들이 밝은 프린지 주위로 모여드는 경향은 $z=2.75$ m의 첫 영상 판부터 궤적들이 점점 멀리 재구성되면서 누적되는 위치오차(position error)

들과 관련된 인위적인 측정 노이즈 때문이다.

궤적들은 2.75 m에서 8.2 m 사이 41개의 영상판들에서 Fig. 2에서 보인 운동량 데이터들을 사용하여 재구성되었다. 80개의 궤적들이 그림에 나타난 대로이다. 이러한 재구성 방식을 위하여, 첫 영상판의 x 위치(transverse)들에 관련된 '약한' 운동량 값들을 결정하였다. 이러한 첫 위치와 운동량 정보에 기초하여서, 궤적이 그 다음 영상으로 진행하는 x 위치를 계산하였고 여기에서 측정되는 '약한' 운동량 값이 얻어지는데, 마지막 영상 판까지 이 과정들이 수행되었다. 이렇게 측정된 단일입자 궤적들은 양자역학에 관한 Bohm-de Broglie 해석이 예측하는 바를 잘 재현하고 있다.^[7]

이상 Kocsis *et al.*의 논문과 그림 요지를 설명하였다. 여기서 Bohm-de Broglie 해석이란 참고문헌 5에서 Bohm의 hidden variable 개념이 포함된 인과론(causality)적 양자역학의 전개이다. 즉 코펜하겐 해석의 인과성 부재를 극복하려는 노력으로, 슈뢰딩거(Schrödinger) 방정식의 파동함수에 위상인자를 가시화하여 복소수의 양자 Hamilton-Jacobi 방정식으로 확장하며, 양자퍼텐셜(quantum potential)을 도입한다. 이 존재가 바로 위의 Fig. 3과 같이 wavy한 궤적을 가능케 한다.

REFERENCES

[7] References 5 & 6.

Fig. 6. (a) Field intensity profiles, and (b) carrier distributions in the time span of 0 ~ 10 psec.

그러한 궤적의 떨림이 양자퍼텐셜의 영향이라면 위 Kocsis *et al.*의 논문 결과가 설명이 된다.

Fig. 5는 Bohm의 양자퍼텐셜 그림들이 나타나는 유사한 경우를 몇 개 보여준다. 하지만 그러한 인과론적 양자역학을 수용하는 학자들은 아직 많지 않다. Bohm-de Broglie의 해석에 근거한 양자퍼텐셜의 존재에 정당성을 부여하는 것을 학계가 아직은 수용하려 하지 않는다.^[8]

학계의 기존 입장은 오래동안 익숙한 코펜하겐 해석이다. Bohm의 hidden variable은 과연 물리적으로 무엇인가? 기존 학계는 그런 ‘물리적으로 모호한’ 해석이 없이 잘 흘러왔다. Kocsis *et al.*의 논문 결과가 결정적인 새 국면을 제공한다고 주류 학계가 느끼지 않는다. 위의 논문 결과가 다른 연구에서 재현될 것인가, 더 정밀하고 설득력 높은 데이터의 발전이 있을 것인가, 등등의 의문이 남는다.

한편 마지막으로 본 저자의 광양자테(photonic quantum ring; PQR) 연구결과를 간단히 요약해본다.^[9] PQR 반도체레이저는 소자 테두리의 낮은 굴절률 경계면에 의한 2차원

whispering gallery mode(WGM)와 상하 수직 공진 모드가 더해진 3차원 Rayleigh Fabry-Perot(RFP)형 whispering cave mode(WCM) 레이저로서, uA ~ nA 급의 극소 문턱 전류, 양자선 특성의 파장 온도 안정성 등의 특성들을 지닌 특수 L(E)D인 원천기술이다.

여기서 PQR 3차원 나선형 공진모드들이 중앙의 quantum well의 2차원 평면을 횡단할 때 남기는 흔적은 보통 예상되는 정상파들의 집합이다. Fig. 6(a)에 나타나는 무늬가 바로 그러한 모습인데, 가로축은 10 ps 시간 내에 나타난 상황이다. 한편 Fig. 6(b)는 동일 시간 내에 quantum well 재결합 평면에 짧은 시간 동안 존재할 자유전자[양공]들의 동적 분포이다.

그런데 Fig. 6(b)에서 전자들의 분포가 수 ps 동안의 chaotic regime 이후 만드는 패턴이 quantum well 상의 랜덤 분포가 아니고 quantum wire-like한 분포이되 그것이 이상하게도 위의 정상파 패턴을 따른다는 사실이다.^[10]

이상과 같이 전자 캐리어가 광소자의 활성층 평면에서 재결합을 앞두고 광파의 파동성을 가지며 양자선의 기능을 한다는 것은 기존 해석과 배치된다. 위의 FDTD 전산 시뮬레이션은 spatio-temporal dynamics 모델에 기초한 것으로, Bohm-de Broglie의 양자퍼텐셜을 상정한 것이 전혀 아니다. 하지만 그러한 가설을 도입한 경우처럼 ‘wavy’한 궤적같은 모습을 가지고 있음은 매우 흥미롭다. 하지만 왜 그런 현상이 생기는지 아직은 구체적인 대답을 제공할 수 없다.

REFERENCES

- [8] O. Kwon and J. H. Son, ‘Observing the Photon Trajectories in a Two-Slit Interferometer: Review’, OSK 2013 Winter Conf. (Daejeon).
- [9] J. Ahn, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, 536 (1999); O. Kwon, *et al.*, ‘Photonic quantum ring from quantum corral of whispering cave mode’, *Trends in Nano- & Micro-Cavities*, Ed. by O. Kwon, B. Lee and K. An (Bentham Books, London, 2011)
- [10] O. Kwon, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 011108-1 (2006); Ref. 9.