Polarization Imaging

세종대학교 장석준 (csj607@gmail.com)

세종대학교 장석준입니다. 편광 이미지 시뮬레이션의 간단한 원리와 시뮬레이션 결과로 만든 그림들을 정리했습니다. 제가 아직 많이 부족해서 조금 앞뒤가 안 맞게 이야기하더라도 조금만 너그럽게 이해해주시면 감사하겠습니다.

1. Origin of Imaging Simulation

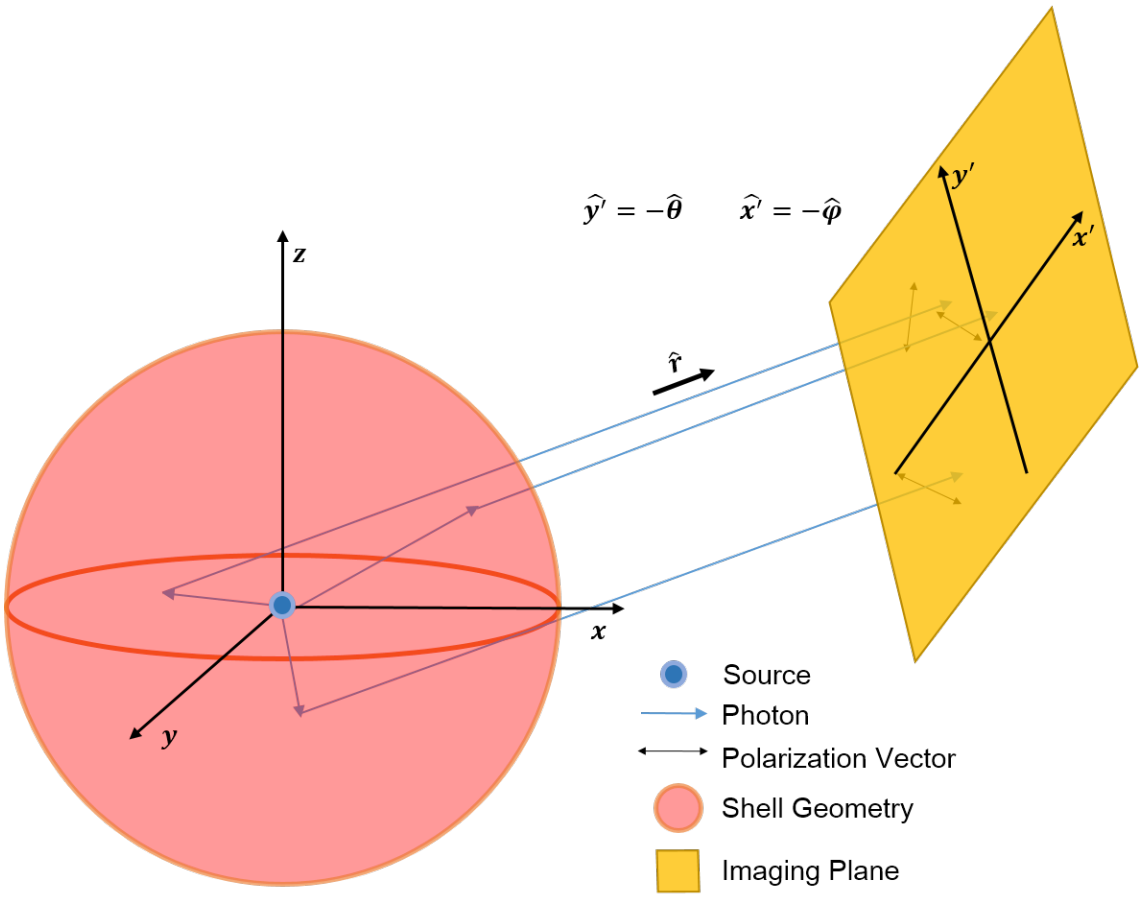

Figure 1: 3차원 Monte-Carlo Simulation과정을 2차원 평면으로 투영시키는 과정

Lyα의 Rayleigh scattering을 위한 Monte-Carlo simulation은 기본적으로 3차원공간에 대해 광자들의 각각의 경로를 쫓습니다. 이전까지는 관측자 시선에 따

른 spectroscopy 또는 spectropolarimetry의 결과를 출력해왔습니다. 이를 위해서 빛이 산란지역을 탈출 할때 wave vector $\hat{k}$의 방향에 따라서 광자들을 모았습니다. Polarization imaging을 위해서 단순히 $\hat{k}$에 대해서만 모은 것이 아니라 $\hat{k}$를 $\hat{r}$으로 놓고 관측자 시선의 이미지의 x'축과 y'축방향의 벡터를 각각 $-\hat{\phi}$ 그리고 $-\hat{\theta}$로 정의했습니다. 그 후 두 벡터 $-\hat{\phi}$와 $-\hat{\theta}$가 이루는 $x'y'$이차원 평면에 3차원 최종 산란위치 $\vec{r}$를 다음과 같이 사영시켰습니다.

$$x' = -\hat{\phi} \cdot \vec{r}, \quad y' = -\hat{\theta} \cdot \vec{r} \tag{1}$$

사영을 하고 난 뒤 $dx'dy'$의 면적으로 나눈 구간에 광자를 모아서 polarization imaging을 구현했습니다.

2. Single Scattering in Spherical Shell

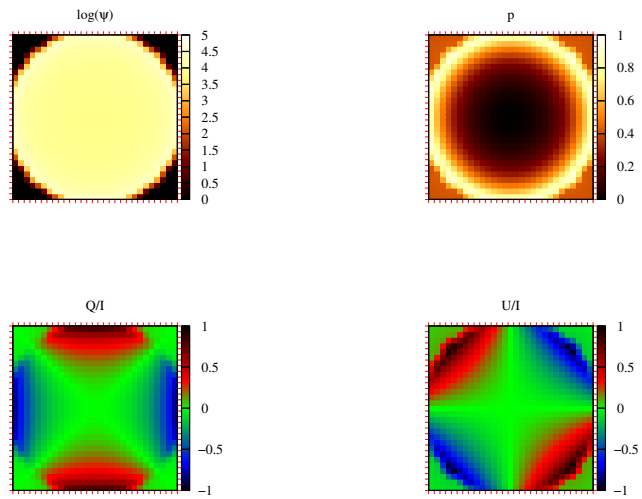

Figure 2: 사영된 좌표계에서 광자들의 정보를 모아 그래프를 그렸다. 좌측 상단은 log scale에서의 광자의 개수에 대한 그래프이고 우측 상단은 편광도(degree of polarization) 에 대한 그래프로 중심부로부터 멀어질수록 편광도가 점점 더 커지는 것을 알 수 있다. 하단 두개의 그래프는 각각 stokes prameter의 Q/I와 U/I를 나타낸 것으로 이를 통해서 편광도와 위와 같은 결과가 나온 다는 사실을 이해 할 수 있다.

가장 기본적으로 코드를 체크하고 편광의 기본적인 성질을 알아보기 위해서, 저는 모델을 원점으로부터 같은거리에 있는 얇은 구껍데기를 가정해서 원점에서 나온 빛의 첫 산란점이 구껍데기 위의 한점이고 무조건 한번 산란하게 만든 뒤에 광자들을 모았습니다. 또한 광원은 isotropic source로 가정을 했습니다.

위와 같은 경우를 가정했을때 편광도(degree of polarization)가 구 대칭으로 나온다는 사실을 예측할 수 있습니다. 왜냐하면 구는 모든 축이 대칭 축이 될 수 있는 3차원 도형이기 때문입니다. 같은 이유로 광자들을 관측자 시선에 따라 모은 결과들도 모두 같아야 하고 그렇기 때문에 모아서 시선방향에 대한 자료들을 모두 합하여 사용해도 문제가 없습니다. 그래서 위의 사항들을 가정하고 시뮬레이션을 했을 때, Fig. 2 와 3과 같은 polarization imaging 결과를 얻게 되었습니다.

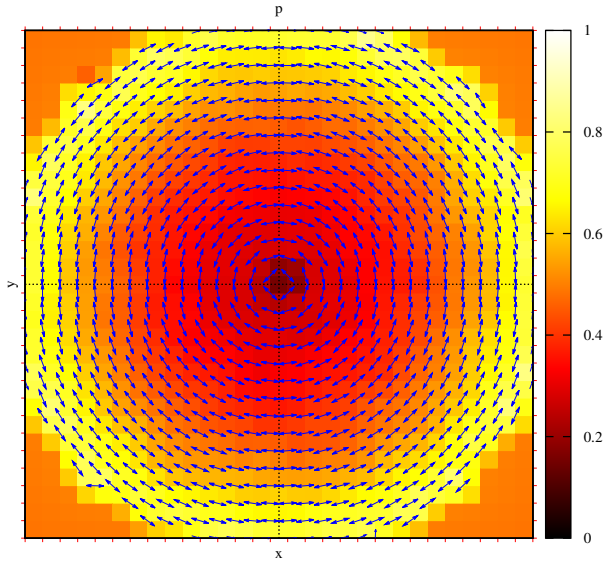

Figure 3: Fig. 2 의 결과를 토대로 편광도의 방향과 편광도의 크기를 같이 그렸다.

Fig. 2 와 3 에서 보이듯이 구형으로된 산란지역을 가정했을때 예측했던 결과와 일치하는 결과가 나왔다는 것을 확인 할 수 있습니다. Fig. 2에 있는 편광도 그래프는 산란 전후의 wave vector $\hat{k}$ 와 $\hat{k}'$ 사이의 각도가 큰경우에 편광이 크게 되는데 이를 잘 보여주고 있습니다. 또한 Fig. 3의 결과에서 보여지는 방사방향의 수직으로 나오는 편광벡터는 Monte-Carlo 방법을 이용한 Rayleigh scattering 과정이 잘 구현되어 있음을 보여주고 있습니다.

3. Multiple Scattering in Spherical Shell

Single scattering effect의 결과가 이론적인 예측과 일치함을 확인을 했기 때문에, 이번에는 원점에 isotropic source를 두고 산란지역을 optical depth τ_R가 $0.1, 1, 2, 5, 10, 100$인 구로 가정하고 시뮬레이션을 해보았습니다. 편광도의 방향은 모두 방사방향에 수직으로 나오는 것을 잘 확인했기 때문에 Fig. 2 와 구조의 그래프들을 τ_R 값에 따라서 그려보았습니다.

Fig. 5 부터 Fig. 9까지를 보면 τ_R가 커질수록 점점 편광도가 중심으로부터의 거리 r 값에만 의존하면서 전체지역에서 모두 작아지는 것을 볼 수 있습니다. 이 결과는 산란지역을 통과하는 동안 여러번의 산란을 하면 여러방향의 편광 방향을 가지는 광자들이 모여서 편광도가 작아지는 것을 의미합니다.

다른 방식으로 이야기하면 작은 τ_R값을 가지는 편광도가 큰 경우는 좌측 상단의 단위 면적당 모이는 광자의 개수가 중심부가 특히 많은 것을 확인 할 수 있습니다. 이는 산란을 한번도 안하고 바로 탈출하는 광자들이 많다는 의미입니다. 이 말은 산란된 광자들은 어차피 산란을 몇번안하고 지역을 탈출한다는 의미이기도 합니다. 이와 다르게 τ_R이 큰 경우는 산란을 안하고 탈출하는 광자가 거의 없습니다.

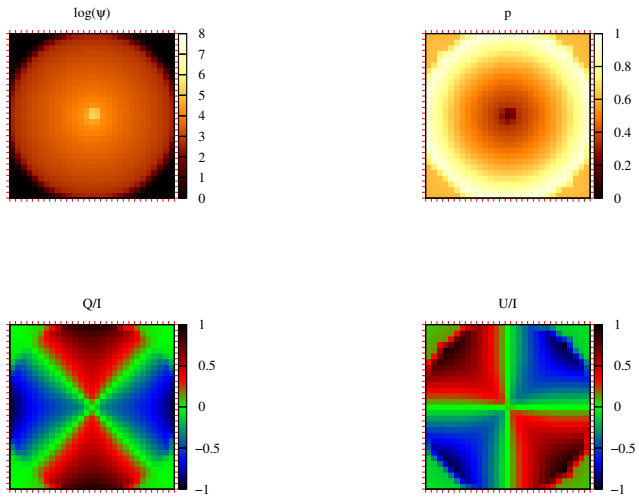

Figure 4: Fig. 2와 같은 구조로 산란지역의 $\tau_R = 0.1$인 경우

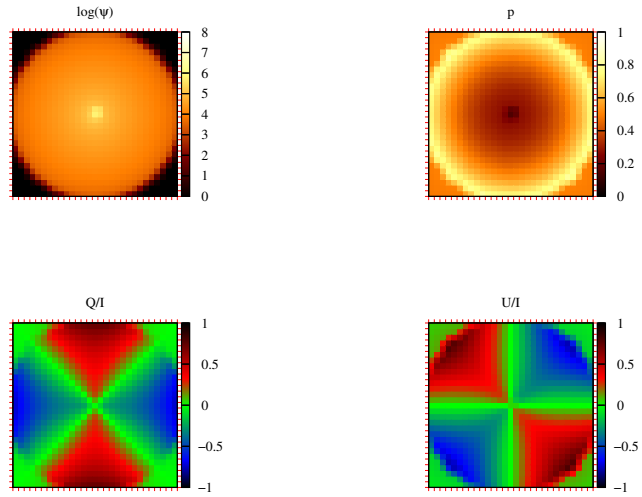

Figure 5: Fig. 2와 같은 구조로 산란지역의 $\tau_R = 1$인 경우

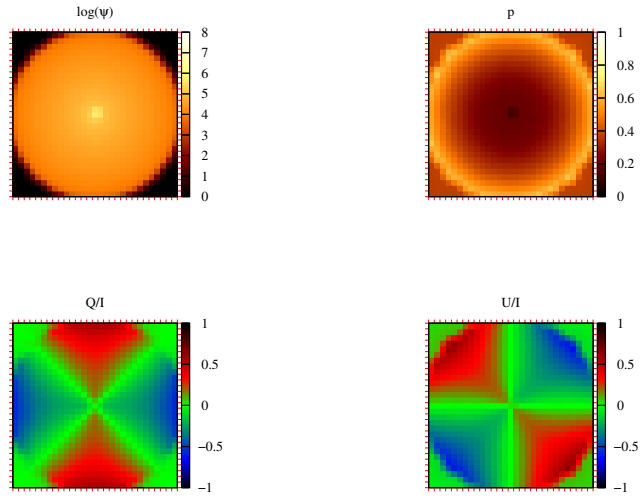

Figure 6: Fig. 2와 같은 구조로 산란지역의 $\tau_R = 2$인 경우

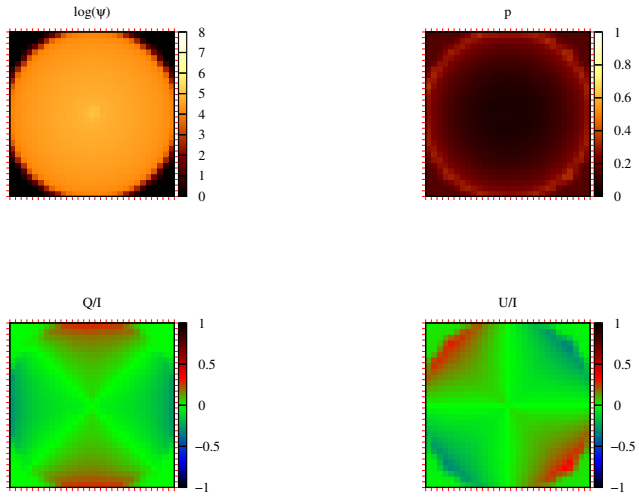

Figure 7: Fig. 2와 같은 구조로 산란지역의 $\tau_R = 5$인 경우

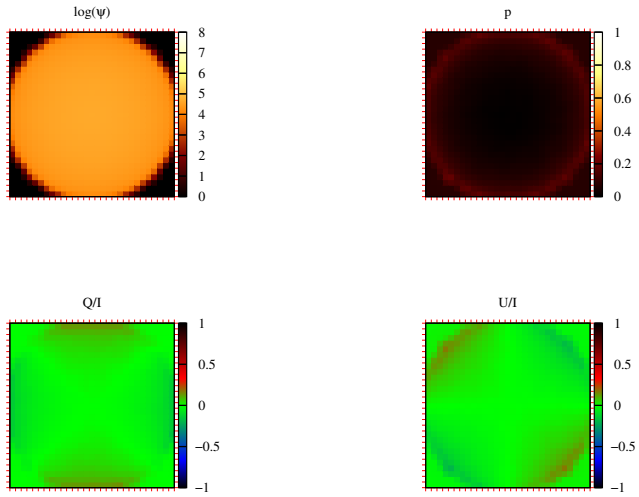

Figure 8: Fig. 2와 같은 구조로 산란지역의 $\tau_R = 10$인 경우

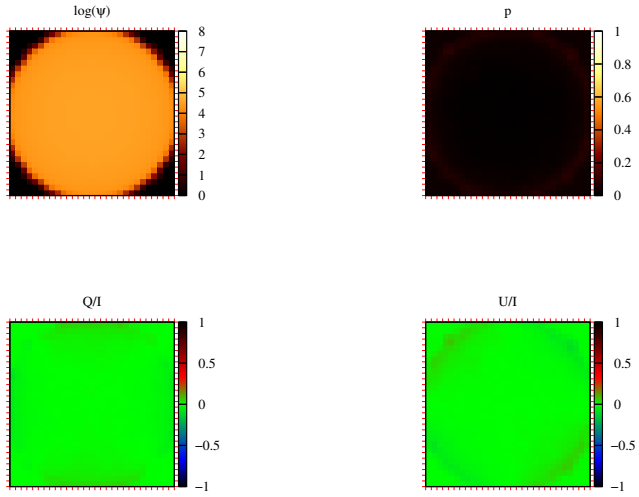

Figure 9: Fig. 2와 같은 구조로 산란지역의 $\tau_R = 100$인 경우

4. Conclusion

이 문서에 있는 결과는 기본적으로 편광도의 크기와 방향이 구형 산란지역에서 나타나는 이론적인 사실을 3차원 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해서 확인했습니다. 또한 산란지역의 optical depth를 임의로 정해서 여러번 산란될 때 편광도가 바뀌는 것을 확인했습니다. 아마 실제와 가깝게 하면 산란지역을 수소로 이루어진 지역으로 가정하고 밀도와 모양을 선택해서 해야합니다. 이 과정은 아마 많이 어렵지는 않을 것 같습니다. 구형의 수소 산란 지역을 가정하고 산란 지역의 중심에 Lyα Source가 있는 경우는 Fig. 10에 있는 cross section σ_{total}을 이용해서 optical depth τ_R을 계산해서 시뮬레이션을 실행하면 됩니다. 결과는 아마 3의 여러번 산란할때의 결과들이 중첩된 결과가 나올 것 입니다.

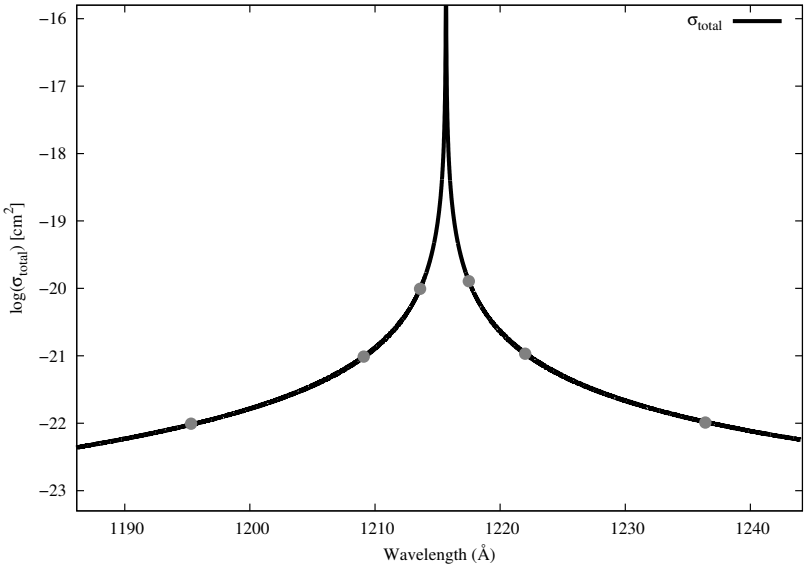

Figure 10: Lyα 주변의 파장에 대한 Rayleigh scattering의 total cross section