

제 19 권 제 1 호

ISSN 2288-050X

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

2022년 12월

우주소립자연연구소

INSTITUTE FOR UNIVERSE AND ELEMENTARY PARTICLES

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

우주소립자연연구소 연구원 (2022-2023)

소 장	문동호(전남대)	Dong Ho Moon (Chonnam National University, Gwangju)
참여교수	주경광(전남대)	Kyung Kwang Joo (Chonnam National University, Gwangju)
	이재식(전남대)	Jae Sik Lee (Chonnam National University, Gwangju)
	박찬범(전남대)	Chan Beom Park (Chonnam National University, Gwangju)
	제송근(전남대)	Soong-Geun Je (Chonnam National University, Gwangju)
	문. 걸(전남대)	Geol Moon (Chonnam National University, Gwangju)
	고아라(전남대)	Ara Go (Chonnam National University, Gwangju)
연구원	박령균(전남대)	Ryeong Gyoon Park (Chonnam National University, Gwangju)
	김현철(전남대)	Hyun Chul Kim (Chonnam National University, Gwangju)

우주소립자 연구지 논문 투고 안내

- 본 연구지는 매년 12월 27일자로 발행되고 있습니다.
- 본 연구지의 논문 투고는 본 연구소 홈페이지의 논문 투고 게시판을 이용하거나 전자우편 (dhmoon@chonnam.ac.kr)을 통해 할 수 있습니다.
- 논문작성에 관한 상세한 사항은 우주소립자 연구소 홈페이지의 논문 투고 규정을 참조하시기 바랍니다.
- 투고한 논문에 대한 기타 사항은 우주소립자 연구소로 문의하시기 바랍니다.

(61186) 광주광역시 북구 용봉로 77 (용봉동)
전남대학교 자연과학대학 4호관 우주소립자연연구소
전화 : 062-530-3354

Website : <http://iuep.jnu.ac.kr>

제 19 권 제 1 호

ISSN 2288-050X

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

2022년 12월

우주소립자연연구소

INSTITUTE FOR UNIVERSE AND ELEMENTARY PARTICLES

목 차

Measurement of cosmogenic ${}^9\text{Li}$ and ${}^8\text{He}$ production rates at RENO	Hyun Gi Lee	01
액체 섬광체로 사진 이미지 분석을 이용한 색상-파장 관계	최지원, 주경광	15

Measurement of cosmogenic ${}^9\text{Li}$ and ${}^8\text{He}$ production rates at RENO

Hyun Gi Lee

Department of Physics, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

We report the measured production rates of unstable isotopes ${}^9\text{Li}$ and ${}^8\text{He}$ produced by cosmic muon spallation on ${}^{12}\text{C}$ using two identical detectors of the RENO experiment. Their β decays accompanied by a neutron make a significant contribution to backgrounds of reactor antineutrino events in precise determination of the smallest neutrino mixing angle. The mean muon energy of its near(far) detector with an overburden of 120(450)m.w.e. is estimated as $33.1 \pm 2.3(73.6 \pm 4.4)$ GeV. Based on roughly 3100 days of data, the cosmogenic production rate of ${}^9\text{Li}({}^8\text{He})$ isotope is measured to be $44.2 \pm 3.1(10.6 \pm 7.4)$ per day at near detector and $10.0 \pm 1.1(2.1 \pm 1.5)$ per day at far detector. This corresponds to yields of ${}^9\text{Li}({}^8\text{He})$, $4.80 \pm 0.36(1.15 \pm 0.81)$ and $9.9 \pm 1.1(2.1 \pm 1.5)$ at near and far detectors, respectively, in a unit of $10^{-8} \mu^{-1} g^{-1} \text{cm}^2$. Combining the measured ${}^9\text{Li}$ yields with other available underground measurements, an excellent power-law relationship of the yield with respect to the mean muon energy is found to have an exponent of $\alpha = 0.75 \pm 0.05$.

Keyword : neutrino, RENO, LS, nGd, PSD

투고일자 : 2022. 12. 13

심사일자 : 2022. 12. 20

확정일자 : 2022. 12. 23

1. 서론

뮤온은 지하 검출기와 주변 암석에서 파쇄 생성물을 생성한다. 충분한 에너지를 가지고 있는 뮤온은 심지어 지하에서도 액체 섬광용액 검출기에서 탄소와 상호 작용하여 불안정한 방사성 동위 원소와 중성자를 생성할 수 있다. 이때, 생성된 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 뮤온파쇄 동위원소는 원자로 중성미자 진동 측정에서 가장 심각한 배경잡음이며[1], 이중 베타 붕괴 및 암흑 물질 실험에서 잠재적인 잡음이 될 가능성이 있다[2,3,4].

${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴는 방출된 중성자와 함께 반전자 중성미자의 역 베타 붕괴 (IBD) 반응을 모방한다. 이때, ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 상대적으로 긴 수명과 단거리 원자로중성미자 실험의 높은 뮤온 선속은 뮤온이 지나간 이후 시간에 따른 기준을 사용하여 IBD 사건에서 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 붕괴를 분리하기 어렵게 만든다. 따라서 중성미자 혼합 각 θ_{13} 를 정확하게 결정하기 위해서는 뮤온 파쇄 생성 동위원소 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 정확한 생산량을 알아내는 것이 중요하다. 뮤온과 뮤온파쇄생성물은 MUSIC[5,14], FLUKA[6], Geant4[7]를 사용하여 큰 오차와 함께 전산모사가 가능하다.

뮤온 파쇄를 통한 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 생성량은 Borexino[8], Daya Bay[9], Double Chooz[10] 및 KamLAND[11]의 지하 실험에 의해 측정 및 보고되었다. 선행연구에서 제시된 측정량은 뮤온파쇄생성 중성자와 ${}^{12}\text{B}$ 의 생성으로부터 간접적으로 측정되거나, 뮤온이 지난 이후 지연된 시간에 의해 얻어졌다. 그러나 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 수명에 비해 상대적으로 높은 뮤온선속이 있는 지하 실험에서는 뮤온파쇄생성물과 관측한 뮤온 사이의 올바른 연관성을 얻어내는 것이 쉽지 않다. 이 논문은 120 그리고 450 m.w.e. 지하에 있는 두 개의 동일한 RENO 검출기에서 발생한 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 생산량을 직접 측정한 결과를 제시한다. 이번 연구에는 검출기를 통과한 전체 뮤온에서 생성된 동위원소의 $\beta - n$ 붕괴 스펙트럼을 이용하여 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 를 측정하는 방법을 사용하였다.

2. RENO 실험

뮤온은 지하 검출기와 주변 암석에서 파쇄 생성물을 생성한다. 충분한 에너지를 가지고 있는 뮤온은 심지어 지하에서도 액체 섬광용액 검출기에서 탄소와 상호 작용하여 불안정한 방사성 동위 원소와 중성자를 생성할 수 있다. 이때, 생성된 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 뮤온파쇄 동위원소는 원자로 중성미자 진동 측정에서 가장 심각한 배경잡음이며[1], 이중 베타 붕괴 및 암흑 물질 실험에서 잠재적인 잡음이 될 가능성이 있다[2,3,4].

RENO 실험은 한빛 원자로에서 생성된 전자 반중성미자의 소실을 관측함을 통하여[12] 가장 작은 중성미자 혼합 각 θ_{13} 를 측정하였다. 두 개의 동일한 근거리 및 원거리 감지기(ND 및 FD)는 원자로 배열 중심에서 각각 290 및 1380 m 거리에 배치되어 있다. 두 검출기는 0.1% 가돌리늄(Gd)이 적재된 액체 섬광체 (LS)를 표적으로 사용하여, IBD 반응을 통해 충돌한 원자로 반중성미자를 검출한다. IBD 상호 작용은 즉각적인 양전자 신호와 Gd에서 중성자 포획된 지연된 신호 사이에 강한 상관관계를 요구함으로써 인하여 식별 될 수 있다.

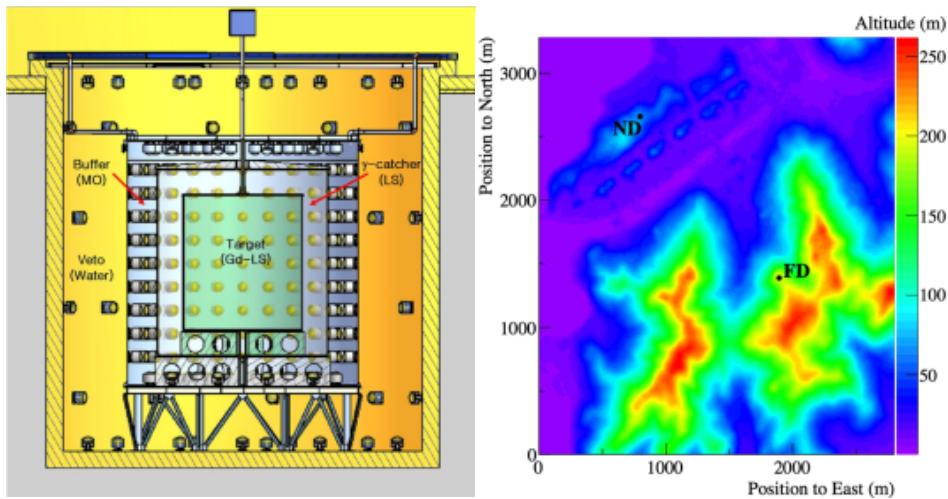


그림 1. (왼쪽그림) RENO 검출기의 개략도. 내부 검출기 (ID)는 중성미자 표적(target), 감마선 포집기(γ -catcher) 및 완충재(buffer)로 구성되며 원통형 스테인리스 스틸 용기에 들어있다. Veto를 위한 외부 감지기 (OD)가 ID를 둘러싸고 있으며, 고도로 정제된 물로 채워져 있다. 광센서로서 Hamamatus의 10-inch PMT인 R7081을 사용하였다[13]. (오른쪽 그림) RENO 검출기 주변 지형의 등고선[15]. 검정색 점은 RENO 근거리 및 원거리 감지기의 위치를 나타낸다. 좌표의 원점은 경도 126.41°, 위도 35.39°이다.

3. ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 사건 선택

3.1. 데이터 샘플

뮤온은 지하 검출기와 주변 암석에서 파쇄 생성물을 생성한다. 충분한 에너지를 가지고 있는 뮤온은 심지어 지하에서도 액체 섬광용액 검출기에서 탄소와 상호 작용하여 불안정한 방사성 동위 원소와 중성자를 생성할 수 있다. 이때, 생성된 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 뮤온파쇄 동위원소는 원자로 중성미자 진동 측정에서 가장 심각한 배경잡음이며[1], 이중 베타 붕괴 및 암흑 물질 실험에서 잠재적인 잡음이 될 가능성이 있다[2,3,4].

이 분석에서는 2011년 8월부터 2020년 8월까지 수집된 약 3100일간의 RENO 데이터를 우주 발생 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 수율 측정에 사용하였다. ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 로의 붕괴로 인해 발생하는 $\beta - n$ 을 얻어내기 위해서, β 붕괴 시 발생하는 즉각적인 신호와 Gd에 의한 중성자 포획으로부터 발생하는 지연된 신호 사이의 상관관계를 요구하였다. 이때, $\beta - n$ 데이터 샘플의 선택 기준은 뮤온파쇄생성물 제거를 위한 조건을 제외하고, 원자로 반중성미자 사건에 대한 선택 기준과 동일하다. 사건 재구성 및 에너지 보정은 Ref.[18]에서 자세히 설명하였다.

3.2. 배경사건

즉각적인 신호와 지연된 신호 사이의 상관관계를 요구하여 얻어낸 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 사건후보에는 배경사건 또한 섞여 있다. 이때, 배경사건은 상관관계가 있는 배경사건과 상관관계가 없는 배경사건으로 나눌 수 있다. 상관관계가 있는 배경사건은 원자로 반전자중성미자 그리고 고속중성자의 상호작용을 통해 발생한다.

원자로반중성미자 IBD 사건은 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ $\beta - n$ 방사체와 동일한 방식으로 선행신호 및 지연신호를 내기 때문에 구별하기가 쉽지 않다. 하지만 IBD의 선행신호 스펙트럼은 8 MeV 이상에서 급속히 줄어드는 반면 ${}^9\text{Li}({}^8\text{He})$ 의 β 스펙트럼은 최대 14(11) MeV까지 존재한다. 고속중성자는 검출기와 주변 암석을 통과하는 뮤온에 의해 생성된다. ID로 들어간 고에너지

중성자는 LS에서 상호 작용하여 포획되기 전에 검출기의 양성자와 탄성 충돌한다. 탄성충돌로 인해 튕겨 나간 양성자는 선행신호 사건을 모방하는 섬광사건을 생성한다. 상관관계가 없는 배경사건은 선행사건과 지연사건 사이에 상관관계가 없는 "우발적배경사건" 때문에 발생한다. 우발적 배경사건에서 선행신호사건의 대부분은 ~ 3 MeV 미만의 에너지를 가진 감마광선에 의해 발생하고, 높은 에너지 영역에서는 거의 발생하지 않는다.

3.3. ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 사건 선택 기준

${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 샘플을 얻어내기 위하여 다음의 기준을 적용하였다. (i) $1.2 < E_p < 15 \text{ MeV}$ 요구사항 (E_p 는 선행사건에너지); (ii) $6 < E_d < 12 \text{ MeV}$ 요구사항 (E_d 는 지연사건에너지); (iii) $2 < \Delta T_{pd} < 100 \mu\text{s}$ 의 시간 상관관계 요구 사항 (ΔT_{pd} 는 선행사건후보와 지연사건후보간의 시간 차이). (iv) $\Delta R < 2 \text{ m}$ 의 공간 상관관계 요구 사항 (ΔR 은 선행신호와 지연신호 사이의 거리). 이 외에도, 뮤온을 사용한 선택조건을 제외한 원자로 반중성미자 사건에 대한 대부분의 사건 선택 기준이 적용되며, 이에 대한 보다 자세한 내용은 Ref.[18]에 나와 있다. 모든 선택 기준을 적용한 이후, 3100일간의 ND (FD) 검출기 데이터에서 1211335(158938)개의 $\beta - n$ 사건후보를 얻어냈다.

4. ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ $\beta - n$ 붕괴 스펙트럼

고순도의 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 샘플은 FD(ND)에서 $E_\mu^{vis} > 1.5(1.6) \text{ GeV}$ 인 뮤온이 지나간 이후 $40 < \Delta T < 500(400) \text{ ms}$ 의 경과 시간을 가지도록 요구하여 얻어냈다. 그림 2는 해당 요구 사항을 적용하기 전에 $\beta - n$ 사건후보의 경과 시간 분포를 보여준다. 이때, $\Delta T < 40 \text{ ms}$ 의 $\beta - n$ 사건후보는 ${}^{12}\text{B} - {}^{12}\text{B}/\text{X}$ 배경사건, IBD 배경사건이 큰 관계로, ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 붕괴 스펙트럼 측정에서 제외되었다.

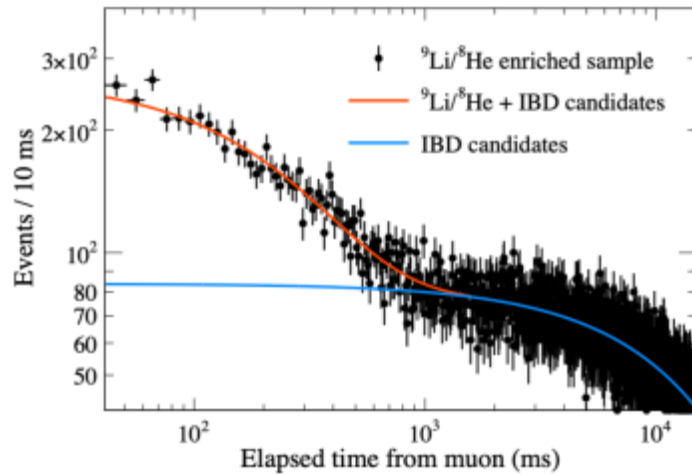


그림 2. 원거리검출기에서 $E_{\mu}^{vis} > 1.5 \text{ GeV}$ 의 에너지를 가진 뮤온에 의해 생성된 $\beta - n$ 사건후보에 대한 경과시간분포

그림 2의 뮤온 경과 시간 분포의 긴 시간 성분($\Delta T > 1 \text{ s}$)은 뮤온과 상관관계가 없는 원자로 반중성미자 IBD 사건후보가 대부분을 차지한다. ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 평균 붕괴 시간은 FD에서 $260 \pm 12 \text{ ms}$ 로 측정되고, ND에서 $258 \pm 20 \text{ ms}$ 로 측정되었다. 이는 ${}^8\text{He}$ 보다 ${}^9\text{Li}$ 가 더 우세하게 생성된다는 것을 의미한다. ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 β -decay 스펙트럼은 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 농축 샘플에서 긴 시간 성분을 소거하여 얻어냈다.

ND와 FD에서 측정된 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ $\beta - n$ 붕괴 스펙트럼이 그림 3과 같다. 8 MeV 미만의 스펙트럼 불확실성은 원자로 반중성미자사건후보의 스펙트럼을 소거하는 과정에서 발생하므로, 8 MeV 미만의 불확실성은 FD보다 ND에서 더 크다. 반면에 8 MeV 이상의 스펙트럼 불확실성은, 더 얇은 지하에서 더 많은 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 생성으로 인해 ND 검출기에 대해 더 작다. 앞서 두 검출기에서 측정된 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 평균 붕괴 시간이 유사하므로, 두 검출기에서 동일한 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 스펙트럼이 예상된다. ND 및 FD 스펙트럼의 가중평균을 통해, ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 통합스펙트럼이 얻어졌으며, ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 생산율 측정에 사용되었다. 통합된 스펙트럼과 전산모사의 예측과 잘 맞음을 그림 3에서 확인 할 수 있다.

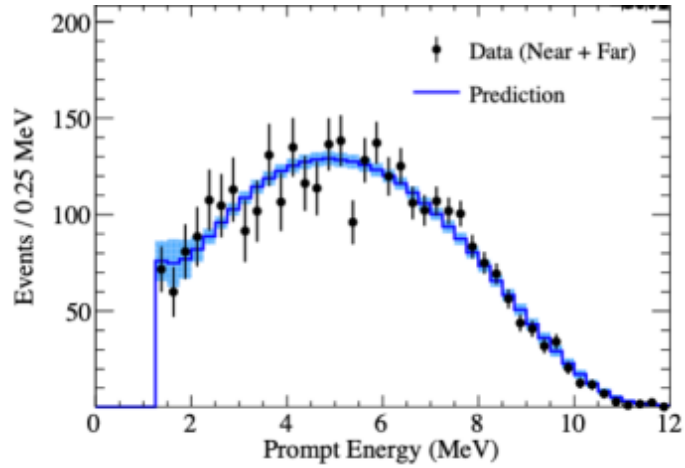


그림 3. ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 스펙트럼을 측정하고 전산모사의 예측과 비교한 것. 스펙트럼의 불확실성이 음영 처리된 밴드로 나타나 있다.

5. ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 생산을 측정

5.1. 배경사건측정

획득한 $\beta - n$ 붕괴사건의 후보샘플에는 $E_p = 3 \text{ MeV}$ 미만의 우발적배경사건과 $E_p \sim 8 \text{ MeV}$ 의 원자로 중성미자 배경사건 그리고 고속중성자 배경사건이 포함되어 있다. 대부분의 배경사건은 8 MeV 보다 큰 선행에너지를 요구함에 의해 제거되었다. $8 < E_p < 15 \text{ MeV}$ 에서 총 $\beta - n$ 사건후보 사건 수는 ND에서 10608, FD에서 5668이다. 고속중성자의 갯수는 평평한 에너지 스펙트럼 모양을 기반으로 $8 < E_p < 50 \text{ MeV}$ 의 고속중성자 배경사건 우세영역에서 외삽을 통하여 추정되었다. 남아있는 IBD배경사건 갯수는 Huber-Mueller[19,20] 예측 스펙트럼을 바탕으로 추정하였다. 나머지 배경사건의 갯수와 스펙트럼은 Ref.[18]에 나와 있다. 아랫 단락부터, 남아있는 ${}^{12}\text{B} - {}^{12}\text{B}/\text{X}$ 배경사건의 갯수를 추정한 방법을 제시하겠다.

앞서 기술한 바와 같이, 뮤온파쇄 방사성 동위원소의 β 붕괴는 Gd의 중성자 포획으로 인해 발생하는 8 MeV 감마광선의 지연사건을 모방할 수 있다. 지하뮤온은 ${}^{12}\text{B}$ 뿐만 아니라 ${}^{12}\text{N}$, ${}^9\text{C}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^8\text{He}$ 그리고 ${}^8\text{B}$ 등의 방사성 동위원소를 생성하며, 이들의 반감기는 10 ms 부터 1 초 에

이른다[15,16]. 이 모든 방사성 동위원소는 종말점 에너지가 10 MeV보다 크기 때문에, 지연에너지선택범위인 6에서 12 MeV 사이의 입자를 내며 붕괴할 수 있다. 이러한 사건은 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 선택을 위한 최종 샘플에서 포함되어 있으며, 이를 " ${}^{12}\text{B} - {}^{12}\text{B}/\text{X}$ " 배경사건 이라고 부른다.

${}^{12}\text{B} - {}^{12}\text{B}/\text{X}$ 농축 샘플을 얻기 위해 선행사건후보와 지연사건후보간의 시간 상관관계(ΔT_{pd})는 100 μs 에서 200 ms로 대폭 증가되었다. 그림 4의 왼쪽은 FD(ND)에서 두 사건 후보 사이의 시간 상관관계를 보여준다. 이것은 단일 우주 뮤온에 의한 여러 ${}^{12}\text{B}$ 가 생산됨을 나타낸다.

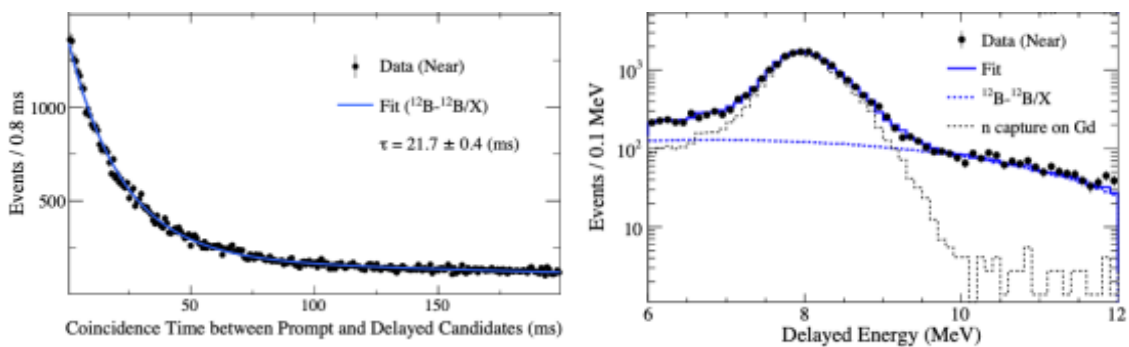


그림 4. (왼쪽그림) 하나의 우주 뮤온에 의해 생성된 여러 ${}^{12}\text{B}$ 붕괴 사이의 시간 상관관계. (오른쪽그림) ${}^{12}\text{B} - {}^{12}\text{B}/\text{X}$ 배경사건이 농축된 $\beta - n$ 샘플에서 지연에너지 분포

그림 4의 오른쪽은 3 ms 미만의 ΔT_{pd} 를 요구하여 얻어낸 ${}^{12}\text{B} - {}^{12}\text{B}/\text{X}$ 농축 샘플의 지연에너지 분포를 보여준다. Gd의 중성자 포획으로부터 발생한 감마선은 8 MeV의 봉우리로 나타나며, β 붕괴를 통해 발생하는 지연에너지 분포는 9 MeV 이상에서 명확하게 나타난다. ${}^{12}\text{B} - {}^{12}\text{B}/\text{X}$ 의 갯수는 Gd의 중성자 포획으로 발생하는 봉우리와 ${}^{12}\text{B}$ 스펙트럼을 사용하여 지연에너지 분포를 피팅하여 얻어내었다. 얻어낸 $\beta - n$ 붕괴사건후보샘플에 남아있는 ${}^{12}\text{B} - {}^{12}\text{B}/\text{X}$ 배경사건의 갯수는 ND에서 하루당 0.05 ± 0.01 개, FD에서 하루당 0.01 ± 0.01 개 이다.

5.2. ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 사건 갯수 측정

$8 < E_p < 15$ MeV에서 관찰된 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 사건 갯수는 그림 5와 같이 최종 $\beta - n$ 샘플에 대한 스펙트럼 피팅에 의해 결정되었다. 피팅은 측정된 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 스펙트럼

모양과 측정된 배경사건의 갯수 및 스펙트럼을 사용하여 수행되었다. $8 < E_p < 15 \text{ MeV}$ 에서 얻은 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 갯수는 ND에서 하루에 1.46 ± 0.07 개, FD에서 하루에 0.37 ± 0.04 개이다. 피팅 결과의 계통오차는 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 스펙트럼 형태의 불확실성, IBD 및 나머지 배경사건의 불확실성에서 비롯된다. 가장 큰 계통오차는 ND에서 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 붕괴 스펙트럼의 불확실성 그리고 FD에서 배경사건으로 인한 것이며, 추가적인 데이터를 통해 줄일 수 있다.

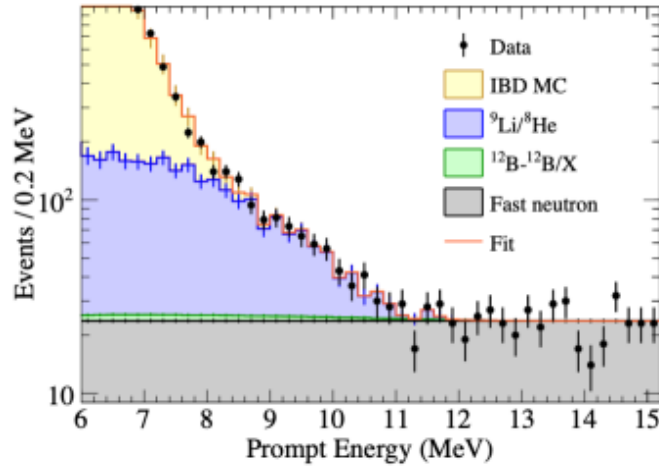


그림 5. ND에서 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 사건 갯수 측정

$8 < E_p < 15 \text{ MeV}$ 에서의 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 사건의 갯수는 스펙트럼 피팅을 통하여 측정하였으며, $1.2 < E_p < 8 \text{ MeV}$ 에서의 갯수는 측정된 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 스펙트럼을 외삽하여 추정하였다. $1.2 < E_p < 15 \text{ MeV}$ 에 대한 ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 사건갯수는 ND의 경우 하루에 $11.92 \pm 0.25(\text{stat.}) \pm 0.38(\text{syst.})$ 개이고, FD의 경우, $3.04 \pm 0.13(\text{stat.}) \pm 0.25(\text{syst.})$ 개이다. ${}^9\text{Li} + {}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴 사건갯수의 가장 큰 측정오차는 ND의 경우 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 스펙트럼의 불확실성, FD의 경우 배경사건의 불확실성에서 비롯된다.

6. ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 뮤온파쇄수율

${}^9\text{Li}$ 혹은 ${}^8\text{He}$ 의 뮤온파쇄수율($Y({}^9\text{Li})$)은, 관측된 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 $\beta - n$ 붕괴율을 바탕으로 아래

수식과 같이 정의되었다.

$$Y(^9\text{Li}) = R_{\beta-n}^{\text{obs}} \cdot \frac{f(^9\text{Li})}{\epsilon(^9\text{Li}) \cdot \text{Br}_{\beta-n} \cdot R_{\mu} \cdot \overline{L}_{\mu} \cdot \rho} \quad (1)$$

수식 (1)에서 각 항들은, 관측된 ^9Li 및 ^8He 의 $\beta - n$ 붕괴율($R_{\beta-n}^{\text{obs}}$), 측정된 ^9Li 붕괴 비율($f(^9\text{Li})$), ^9Li 측정 효율($\epsilon(^9\text{Li})$), $\beta - n$ 붕괴비율($\text{Br}_{\beta-n}$), 표적을 통과하는 뮤온의 선속(R_{μ}), 표적에서의 뮤온의 평균 이동 길이(\overline{L}_{μ}) 그리고 표적의 밀도(ρ)를 의미한다.

^9Li 또는 ^8He 의 $\beta - n$ 붕괴에 대한 검출 효율은 통제된 샘플과 전산모사를 사용하여 얻어내었다. 대부분의 $\beta - n$ 선택효율은 IBD[18] 선택효율과 동일하다. $E_p > 1.2$ MeV을 요구하는 선행에너지 선택효율은 ^9Li 의 경우 (92.0 ± 2.3)%, ^8He 의 경우 (86.7 ± 2.5)%이다. 선택효율 오차의 대부분은 예상되는 β 붕괴 스펙트럼의 불확실성에서 비롯된다. ^9Li (^8He)의 전체검출효율은 ND의 경우 (56.2 ± 1.6 %),(53.0 ± 1.7 %), FD의 경우 (49.6 ± 1.5 %),(46.8 ± 1.5 %)이다.

수식 1을 사용하여 얻어낸 ^9Li 수율은 $10^{-8} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$ 의 단위를 가지며, ND의 경우 4.80 ± 0.36 , FD의 경우 9.9 ± 1.1 로 측정되었다. ^8He 수율은 ND의 경우 1.15 ± 0.81 , FD의 경우 2.1 ± 1.5 로 얻어졌으며, 에너지가 커서 ^8He 가 생성되었다고 이야기하기는 힘들다. 지하실험에서 뮤온파쇄생성물의 수율은 평균 뮤온 에너지(GeV)에 따라서, 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$Y = Y_0(\overline{E}_{\mu})^{\alpha} \quad (2)$$

여기서 α 는 \overline{E}_{μ} 의 거듭제곱 지수이다. 평균 뮤온 에너지는 MUSIC 프로그램을 이용한 전산모사[5]를 통해 얻어내었으며, ND 및 FD 사이트에 대해 각각 33.1 ± 2.3 및 73.6 ± 4.4 GeV이다. 그림 6은 이번에 측정한 ^9Li 와 ^8He 뮤온파쇄수율을 다른 측정값과 비교한 것이다.

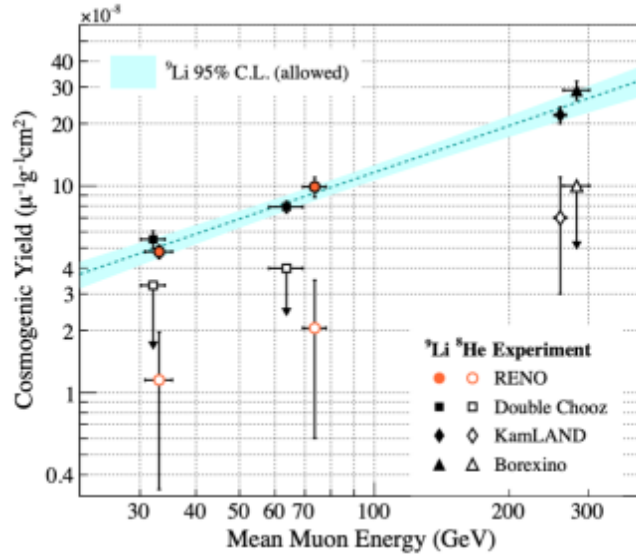


그림 6. RENO의 ND 및 FD에서 뮤온파쇄로 발생한 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 수율을 측정된 것. Borexino[8], Double Chooz[10] 및 KamLAND[11]의 측정값과 비교하였다. 화살표는 2σ 의 상한선을 나타낸다.

Double Chooz의 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 의 뮤온파쇄수율은 뮤온이 지나간 뒤 1 ms 이후, 뮤온궤적주변에서 생성된 ${}^{12}\text{B}$ 의 거리분포와 중성자의 개수분포를 사용하여 얻어내었다[10]. 이러한 이전의 측정은 이전 뮤온과의 뮤온파쇄생성물과의 시공간 상관관계를 기반으로 하였다. 그러나 얇은 지하에서 ${}^9\text{Li}$ 또는 ${}^8\text{He}$ 수명에 비해 뮤온 선속이 큰 경우, 이러한 시공간 상관관계가 불확실해진다. RENO의 측정은 이전측정과 같이 뮤온과의 시간 및 공간 상관관계에 의존하지 않고, $8 < E_p < 15$ MeV에 스펙트럼을 피팅하여 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 에 의한 $\beta - n$ 붕괴가 얼마나 있는지 얻어내었다. ${}^9\text{Li}$ 수율은 다양한 지하 위치에서의 수식(2)를 통해 피팅 되었으며, $\alpha = 0.75 \pm 0.05$ 및 $Y_0 = (0.37 \pm 0.08) \times 10^{-8} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$ 를 그림 6과 같이 찾아내었다.

7. 요약

뮤온의 파쇄반응을 통하여, $\beta - n$ 붕괴하는 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 가 RENO ND 및 FD에서 생성되었다. 스펙트럼 피팅을 통하여, 이들의 생성량이 뮤온과의 시공간 상관관계를 사용하지 않고,

직접적으로 얻어내졌다. 두 동위원소의 상대적 비율은 붕괴의 전산모사 예상 스펙트럼을 비교함을 통해 측정되었고, 이를 통하여 ${}^9\text{Li}$ 및 ${}^8\text{He}$ 각각의 산출량을 직접 얻어낼 수 있었다. ${}^{12}\text{B}$ 및 ${}^{12}\text{N}$ 와 같은 다른 뮤온파쇄 방사성 동위 원소도 측정되었으며, $\beta - n$ 샘플에 대한 이들의 기여도가 추정되었다.

2개의 깊이가 다른 지하검출기에서 얻어낸 ${}^9\text{Li}$ 의 뮤온파쇄수율은 평균 뮤온 에너지와 명확한 상관관계를 보여준다. ${}^9\text{Li}$ 의 뮤온파쇄수율과 평균 뮤온에너지사이의 상관관계는 사용 가능한 다른 측정값과 결합되어 멱함수 관계로 피팅되었다. 얻어낸 멱함수 관계는 ${}^{12}\text{C}$ 기반 지하 검출기에서 $\beta - n$ 붕괴 배경사건 갯수를 예측하는 것에 유용한 정보를 제공한다.

References

- [1] G. Bak *et al.* (RENO), "Measurement of Reactor Antineutrino Oscillation Amplitude and Frequency at RENO", *Phys. Rev. Lett.* 121, 201801 (2018).
- [2] D. Adey *et al.* (Daya Bay), "Measurement of the Electron Antineutrino Oscillation with 1958 Days of Operation at Daya Bay", *Phys. Rev. Lett.* 121, 241805 (2018).
- [3] H. de Kerret *et al.* (Double Chooz), "Double Chooz θ_{13} measurement via total neutron capture detection", *Nat. Phys.* 16, 558 (2020).
- [4] T. Hagner, R. von Hentig, B. Heisinger, L. Oberauer, S. Schönert, F. von Feilitzsch, and E. Nolte, "Muon induced production of radioactive isotopes in scintillation detectors", *Astropart. Phys.* 14, 33 (2000).
- [5] V. A. Kudryavtsev, "Muon simulation codes MUSIC and MUSUN for underground physics", *Comput. Phys. Commun.* 180, 339 (2009).
- [6] A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso, and J. Ranft, "FLUKA: A multi-particle transport code (Program version 2005)", doi:10.2172/877507 (2005).
- [7] J. Allison *et al.*, "Geant4 developments and applications", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 53, 270 (2006).
- [8] G. Bellini *et al.* (Borexino), "Cosmogenic backgrounds in Borexino at 3800 m water-equivalent depth", *J. Cosmo. Astropart. Phys.* 08 (2013) 049.
- [9] F. P. An *et al.* (Daya Bay), "Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment", *Phys. Rev. D* 95, 072006 (2017).
- [10] H. de Kerret *et al.* (Double Chooz), "Yields and production rates of cosmogenic and measured with the Double Chooz near and far detectors", *J. High Energy Phys.* 11 (2018) 053.
- [11] S. Abe *et al.* (KamLAND), "Production of radioactive isotopes through cosmic muon spallation in KamLAND", *Phys. Rev. C* 81, 025807 (2010).
- [12] J. K. Ahn *et al.* (RENO), "Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment", *Phys. Rev. Lett.* 108, 191802 (2012).

- [13] K. J. Ma *et al.* (RENO), "Time and amplitude of afterpulse measured with a large size photomultiplier tube", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 629, 93 (2011).
- [14] A. Tang, G. Horton-Smith, V. A. Kudryavtsev, and A. Tonazzo, "Muon simulations for Super-Kamiokande, KamLAND and CHOOZ", Phys. Rev. D 74, 053007 (2006).
- [15] T. Tadono, H. Nagai, H. Ishida, F. Oda, S. Naito, K. Minakawa, and H. Iwamoto, "Generation of the 30 M-MESH global digital surface model by alos prism", Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 41, 157 (2016).
- [16] F. Ajzenberg-Selove, "Energy levels of light nuclei A = 11-12", Nucl. Phys. A 506, 1 (1990).
- [17] D. R. Tilley, J. H. Kelley, J. L. Godwin, D. J. Millener, J. E. Purcell, C. G. Sheu, and H. R. Weller, "Energy levels of light nuclei A=8, 9, 10", Nucl. Phys. A 745, 155 (2004).
- [18] S. H. Seo *et al.* (RENO), "Spectral measurement of the electron antineutrino oscillation amplitude and frequency using 500 live days of RENO data", Phys. Rev. D 98, 012002 (2018).
- [19] P. Huber, "On the determination of anti-neutrino spectra from nuclear reactors", Phys. Rev. C 84, 024617 (2011); 029901(E) (2012).
- [20] T. A. Mueller *et al.*, "Improved predictions of reactor antineutrino spectra", Phys. Rev. C 83, 054615 (2011).

액체 섬광체로 사진 이미지 분석을 이용한 색상-파장

관계

최지원, 주경광

중성미자 정밀연구센터, 전남대학교 물리학과, 광주광역시 북구 용봉로 77, 61186, 대한민국

이 논문은 다양한 소스를 사용하여 색상-파장(H-W)의 상관관계를 측정하고 이를 이용하여 형광 이미지 분석에 적용할 수 있는 가능성을 조사한 결과에 대해 보고하고자 한다. 액체 섬광체에 용해된 플루오르 성분의 스펙트럼을 추정하기 위해 디지털 이미지 분석이 도입되었다. 컬러 이미지 재구성 및 이미지 디코딩을 위해 Bayer 컬러 필터 어레이(CFA)와 디모자이크 기법이 적용된 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 이미지 센서가 사용되었다. 물리적으로 색조와 파장은 밀접한 관련이 있다. 현재까지 특히 청색 또는 UV 영역에 가까운 H-W 관계를 측정하는 문헌 보고서는 없다. UV 영역에 가까운 H-W 상관 관계를 연구하는 목적은 중성미자 실험에 사용된 광전자 증배관(PMT)의 최대 양자 효율(Quantum Efficiency, QE)이 약 420nm 정도이기 때문이다. 또한 PMT 기반 실험에서 이 영역의 파장 스펙트럼을 잘 이해할 필요가 있다. 그리고 H-W 관계를 구하면 영상을 분석하여 주파장을 식별할 수 있게 된다. CMOS Bayer CFA 접근 방식은 값비싼 분광광도계를 사용하지 않고도 액체 섬광체(LS) 샘플의 형광 스펙트럼을 추정할 수 있어 흥미로운 주제이다.

키워드 : 사진 이미지, 색상-파장, LS, PMT, CMOS

투고일자 : 2022. 12. 13

심사일자 : 2022. 12. 20

확정일자 : 2022. 12. 23

1. Introduction

The liquid scintillator (LS) is a mixture of an organic base solvent and fluor [1-3]. The organic solvent carries out the bulk of the energy absorption. Dissolved in the solvent, molecules of fluor convert the absorbed energy into light. The emitted light is generally read by a photomultiplier tube (PMT) and the maximum quantum efficiency (QE) of the bi-alkali PMT is around 420nm. A fluor can be added to match the maximum QE of the PMT. In our study, 2,5-diphenyloxazole ($C_{15}H_{11}NO$, PPO) was used as a primary fluor, and 1,4-bis(5-phenyl-2-oxazolyl) benzene ($C_{24}H_{16}N_2O_2$, POPOP), or 1,4-bis(2-methylstyryl) benzene ($C_{24}H_{22}$, bis-MSB) was tested as a secondary fluor. Traditionally, the absorption or emission wavelength of these fluors can be measured with the help of a UV/Vis spectrometer or fluorescence spectrophotometer. These optical devices are very expensive. When measuring physical variables, careful handling is required. In this study, we obtain the emission spectrum emitted from LS. For this purpose, instead of using a conventional spectrophotometer, color image processing was performed using CMOS sensors technology. After irradiating UV light on LS sample, a digital photo image in color space was taken by a CMOS Bayer CFA-based digital camera. Meanwhile, it is necessary to understand the several color spaces needed for our study. In 1931, the International Commission on Illumination (CIE) defined RGB color space [4-6]. The RGB space is a three-dimensional color space whose components are red (R), green (G), and blue (B) light. The trichromatic values (R, G, B) combine together to reproduce a broad band of colors in the visible region. The CIE color space is used today not only as a standard to define colors, but also as a reference for other color spaces. By combining (R, G, B) values, the CIE model can reproduce almost any color that the human eye can perceive. Alternatively, hue (H), saturation (S), value (V) is another representation of the RGB space. According to the HSV model, color is not defined as a simple combination of the addition or subtraction of primary (R, G, B) colors, rather it is defined by a non-linear mathematical transformation [7]. Physically, H is related to wavelength. S

describes how much gray is contained in a specific color and V represents the brightness. In our study, S and V values were used to reject backgrounds. If the RGB values of each pixel are known, the HSV value can be obtained. Then, the H value information can be converted to the corresponding wavelength. Our aim is to estimate the emission spectrum of fluors through the hue and wavelength (H-W) mapping relation from color images using a digital camera based on CMOS sensors technology.

2. Motivation

There are two major motivations to this study. Firstly, according to the previous results, the H-W relation was assumed to be approximately linear, but we want to find a more accurate relationship down to the blue wavelength region. Once RGB values are known, RGB values can be converted to HSV values, and the wavelength can be obtained with the following linear approximation equation [8–11];

$$\text{Wavelength} \cong A - \left(\frac{C}{B}\right) \times (H), \quad (1)$$

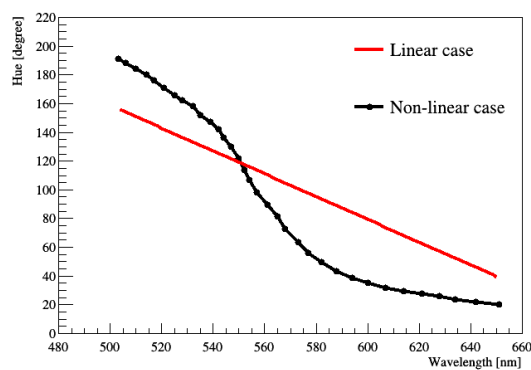


Figure1. Linear case of H-W relationship

where A is the endpoint of visible light, spanning 620~700 nm, B is the maximum value of hue, which is 270, C is a coefficient that converts hue to wavelength, and is in the range 170 and 340 nm, and H represents a limited hue value in the range 0~270 [12–16]. When converting to a wavelength, and approximation has been obtained using a linear relationship. As shown in figure1, it was measured that the H–W relationship is not linear in the red and green wavelength regions [8–11]. Furthermore, since the blue color wavelength band that is mainly used in high energy experiments has not been measured, it is necessary to measure the wavelength region below 450 nm. Through the H–W mapping relation of the emission spectrum from LS, we want to estimate what kind of fluors are dissolved in the sample. The wavelength was obtained through image analysis of the photo obtained using a digital camera based on CMOS sensors. Even without using an optical spectrophotometer, information about the emission wavelength of fluors dissolved in LS can be estimated by the H–W relationship. Even, a mobile phone employing a CMOS sensor can be used as an alternative to the optical spectrophotometer. Secondly, the emission spectra of PPO, POPOP, and bis-MSB lie in the blue region [17]. To date, there has been no study in the literature of the emission spectra, based on H– W relationship especially for the blue region, or the region close to UV. It was mainly measured in the green or red regions [8–11]. As already mentioned, most of the PMTs used in experimental high energy physics or neutrino experiments have an optimized QE near ~430 nm. An expensive UV/Vis spectrometer or fluorescence spectrophotometer are commonly used to obtain information on the absorption and emission spectra of fluors. However, there is no need to distinguish the wavelength of light entering the PMT down to a few nanometers, though it is necessary to know its information in this wavelength region at a reasonable level [18]. The region of main peaks where the fluors emitted lights coincided with the PMT's maximum QE band. Therefore, we considered a method to easily identify the fluor emission spectrums by decoding digital photo images through the H–W relationship.

3. Liquid scintillator

Liquid scintillator (LS) is composed of a basic solvent, fluor to emit light, and a wavelength shifter to change the wavelength of the generated light to the maximum efficiency range of the PMT [3, 19].

Base solvent	Fluor	Wavelength shifter
PC (pseudocumene, C ₉ H ₁₂), LAB (linear alkyl benzene, C _n H _{2n+1} -C ₆ H ₅ , n=10~13), DIN (di-isopropylnaphthalene, C ₁₆ H ₂₀)	PPO BPO PTF	Bis-MSB POPOP

Table1. Composition of liquid scintillator

Metals such as gadolinium (Gd) or lithium (⁶Li) are sometimes dissolved in the basic configuration of LS as a method to increase detection efficiency. PC (pseudocumene, C₉H₁₂, 1,2,4-trimethylbenzene), PXE (phenyl xylyl ethane, C_nH_{2n+1}-C₆H₅, 1,2-dimethyl-4-(1-phenylethyl)-benzene), LAB (linear alkyl benzene, C_nH_{2n+1}-C₆H₅, n=10~13), DIN (di-isopropylnaphthalene, C₁₆H₂₀), which are well known liquids with high light emission, are used as basic solvents. In the case PC, it has a low flash point (48°C) and has a problem of stability because it has toxicity. LAB has a high flash point (130°C) and is well known as a safe basic solvent without toxicity [20-22]. The basic solvent absorbs light and emits it again. At this time, the emitted light has an inappropriate wavelength for measurement by PMT. Therefore, fluor such as PPO (2,5-diphenyloxazole, C₁₅H₁₁NO) is added to show high absorption at the wavelength of the emitted light and to make the PMT emit light of a measurable wavelength (~420 nm) with maximum QE. After that, LS is manufactured by adding fluor such as bis-MSB (1,4-bis(2-methylstyryl)-benzene) and POPOP (1,4-bis(phenyloxazol-2-yl)-benzene), which are wavelength shifters, for fine wavelength control [23-24]. In this study, LAB-

based LS was synthesized and tested. PPO, PPO+bis-MSB, PPO+POPOP, and 6-FAM (6-Carboxyfluorescein) were photographed with a CMOS-based camera to confirm whether light of a desired wavelength was emitted.

4. Image analysis

4.1. Photo image processing analysis

4.1.1 Color filter array (CFA)

A digital cameras equipped with a complementary metal oxide semiconductor (CMOS) technology was used for the digital image analysis. Each pixel of most commercial CMOS image sensors is equipped with a CFA. The CFA configuration in the CMOS is a Bayer filter mosaic consisting of red (R), green (G), and blue (B) filters that could cover a broad area of color space. In CFA, only one color among RGB is recorded at each pixel. The other missing two color values are estimated from the recorded mosaic data of RGB values through an interpolation process called demosaicing (or demosaicking) [25, 26]. Numerous demosaicing algorithms have been proposed. Among them Bayer CFA is widely used. The missing data for each color channel is estimated based on neighboring pixel information. On the contrary, the diffraction grating-based spectrometer has a different grating constant according to the refractive index, so it can form a fine baseline that can be distinguished at the level of 1 nm. The several integration technology of CFA-based CMOS image sensor has been developed [9]. One of workflow examples was shown in figure 2. The disadvantage of the CFA-based camera is that the original color is decomposed into three color filters and cannot be accurately expressed when converted back to the original color during the demosaicing process. Namely, the demosaicing process in Bayer CFA cannot represent the original color due to a lack of information when converting to the original color. In addition, the effects of optical or electrical cross talk due to CMOS pixel structure cannot be ignored, so color correction will be required [27].

Manufacturers apply an algorithm that optimizes signal-to-noise ratio to accurate color reproduction. In the neutrino experiment, there is no need to distinguish the wavelength of light entering the PMT down to a few nanometers. Therefore, we considered a method to easily identify the fluor contents by analyzing the WbLS emission spectrum, and hence took the Bayer CFA approach to the demosaicing process.

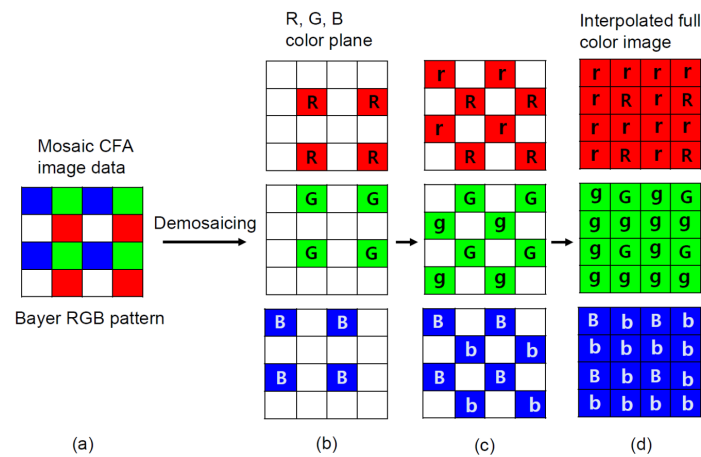


Figure2. Color filter array arrangement and demosaicing processing

4.1.2 Color space

XYZ color space was defined by the CIE in 1931 [28, 29]. The CIE 1931 color space is used today as a standard to define colors, and as a reference for other color spaces. When (R, G, B) values are combined, the CIE model can reproduce almost any color that a human eye can perceive. On the other hand, the H, S, V model is an alternative representation of the RGB model. The HSV model says that color is not defined as a simple combination of adding or subtracting primary colors but it is a non-linear mathematical transformation [30]. If RGB values are known, RGB can be converted to HSV values. Physically, hue is related to wavelength for spectral colors. Therefore, a wavelength can be obtained by a dominant hue value of the spectrum using the appropriate conversion method

4.2. Digital image sensor

4.2.1 Complementary metal oxide semiconductor (CMOS) sensor

For the image analysis, a commercially available digital camera equipped with a CMOS image sensor was used. In our study, we used a 12 mega-pixel mobile phone (Samsung Galaxy S-series) or a digital single lens reflex (DSLR, Canon EOS D series) camera. Each pixel of most commercial CMOS image sensors is covered by a CFA. Each pixel receives only a specific range of wavelengths according to the spectral transmittance of the filter. The CFA configuration in the CMOS is a Bayer CFA consisting of R, G, and B filters and covers a broad band of color space. In CFA, each pixel captures just one color among R, G, or B. The other missing two color values are estimated through an demosaicing interpolation process [25, 26]. There are many proposed demosaicing algorithms [31-35]. Among them, Bayer CFA is widely used and shown in figure 2. Basically, the missing unknown data for each channel is estimated based on neighboring pixel information. Nevertheless, due to the lack of information during the demosaicing process, the original color decomposed into three color filters cannot be fully restored. Figure 3 is a typical image processing pipeline of digital camera [36]. An image pipeline is the set of components commonly used for digital image process consisting of several distinct processing blocks. It plays a key role in digital camera systems by generating a digital color image. When we take a picture, it is initially saved as raw image data [37, 38]. They are minimally processed data from the image sensor. The raw data files created by a digital camera contain a CFA image recorded by the photosensor of the camera. Each pixel of raw data is the amount of light captured by the corresponding camera photosensor. Further process of generating jpeg digital image with raw data is performed.

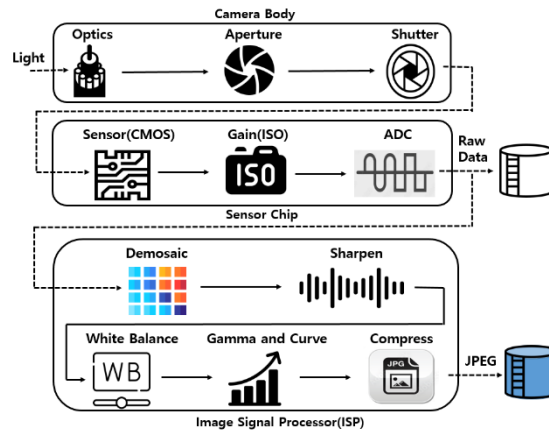


Figure3. Schematic of the color image pipeline for making image

4.2.2 Hue-wavelength (H-W) response

Figure 4 shows the mapping between wavelength and hue for the Canon 300D camera employing CMOS sensor CFA technology for the wavelength from 500 to 650 nm [10, 39]. This graph shows several features. There are plateau regions with wavelength in the range 530~560 nm and over 600 nm. At the near end of wavelengths 530~560 nm, it looks like a step-like H-W response. These features are a direct result of the CFA color filters used in the CMOS sensor. The CFA arrangement made these patterns in the H-W curve. At 120° hue (wavelength ~560 nm), only the green component exists. Because neither the blue nor red filters transmit significantly in this region, the plateau naturally occurs. The sharp drop of hue to 0° over wavelength 620 nm is also due to the properties of CFA color filters. Since the nature of the H-W response of CFA color filters does not allow wavelengths of a few nanometer scale to be distinguished, it should be used with caution in certain wavelength ranges. Furthermore, over 650 nm, it was not possible to obtain the H-W relation. The difference in conversion from H to W was so small that it was very difficult to distinguish neighboring values. To measure this region, we need to use a camera with a sensor sensitive to the red or IR side. Overall, figure 4 shows that H-W relationship was highly non-linear.

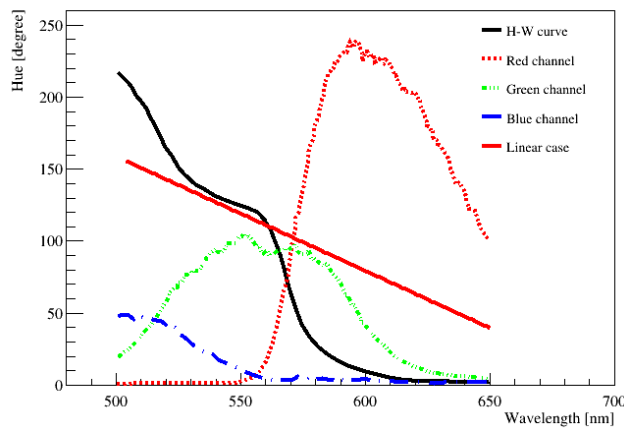


Figure4. H-W response curve using CMOS CFA technology

5. Results

5.1. H-W reaction using CMOS sensor

Figure 5 shows the experimental setup for generating light and taking pictures with a digital camera. The experiment was performed using a 4-pin light emitting diode (LED) including a minus cathode pin. For higher light intensity, a module in which several LEDs are bundled into one is used. This LED disc was connected to a single board Arduino module [40]. Arduino is a device equipped with microcontroller kits that provides open source hardware and software. RGB values can be changed in units of 1 nm, originally wavelength from 380 and 780 nm can be generated. Each RGB color light was emitted from the LED board, and each light must be thoroughly mixed. A black foam board with good reflectivity was used as a L-shaped wall. To prevent external background light from entering the camera lens, the digital camera was positioned at 90 degrees to the axis of the LED source, as shown in figure 6. For the background rejection and image calibration, experiments

related to distance and refraction were performed in a dark room that excluded any ambient or stray light. After the light was reflected off the wall of the black form board, only the well-mixed desired light reaches the camera.

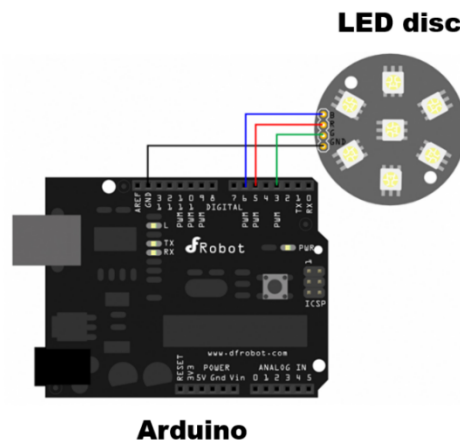


Figure5. Experimental setting for generating lights using LED disc

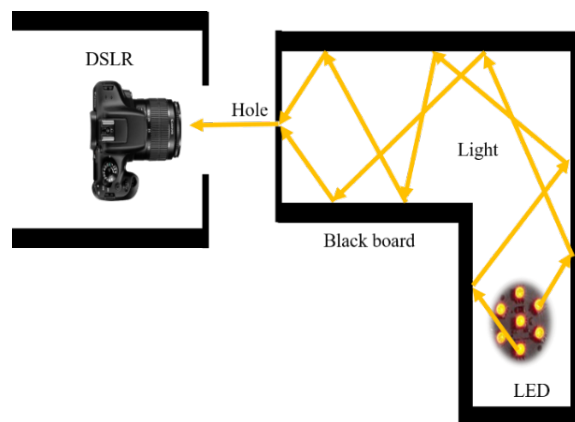


Figure6. Schematic for taking digital image photo

Figure 7 shows RGB color in units of wavelength of 1 nm. By assigning each RGB value to color pins of the LED disc, the desired wavelength can be generated. For example, if (0, 182, 255) is assigned to the R, G, B value in the LED, respectively, light with wavelength of 473 nm is generated. For calibration, both a colorimeter and three laser modules with wavelengths of 375, 405, and 440 nm were used. With this method, the wavelength corresponding to each color can be generated. When taken with digital camera, color images appear as shown in figure 8. Photographs were taken

with wavelengths ranging 380 to 650 nm at intervals of 10 nm. The response of the camera used was not sensitive to wavelength that exceeded 650 nm.

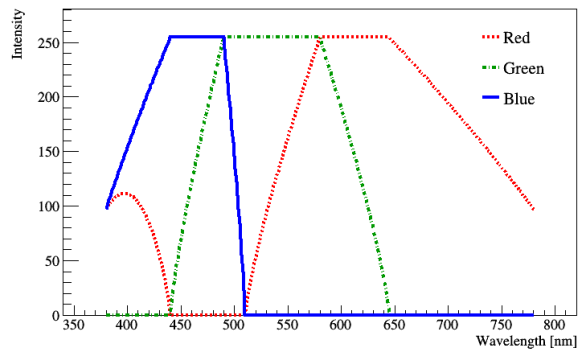


Figure7. RGB intensity as a function of wavelength

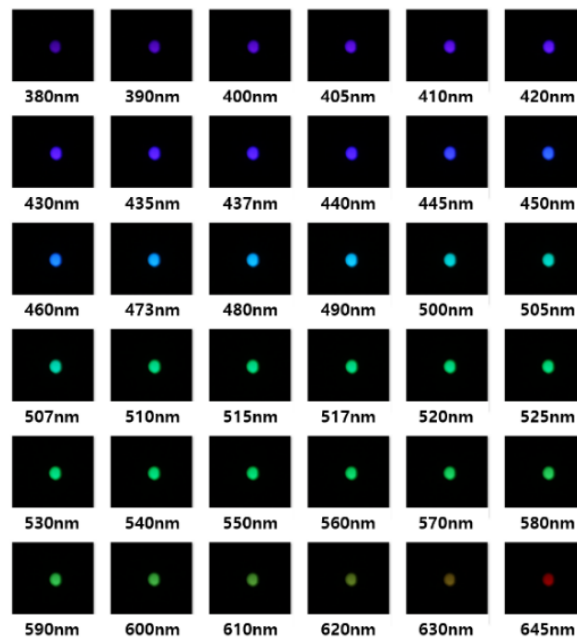


Figure8. RGB color and corresponding wavelength

Figure 9(a) represent digital color images at wavelengths of 380nm, respectively. Figure 9(b) show their hue distributions obtained from the color information. A dark color mixed with black appeared on the edge of the third box, so this region was rejected as a background. The image is divided into rectangular boxes to use V cut. The only V values in the first box corresponded to about 0.6 or more, and were used for the final analysis. The S value is the percentage of white light, which

did not affect our analysis. In the same way, it is possible to know the hue distribution of all wavelengths in the 380 to 645 nm region that can be obtained through the RGB values in the LED.

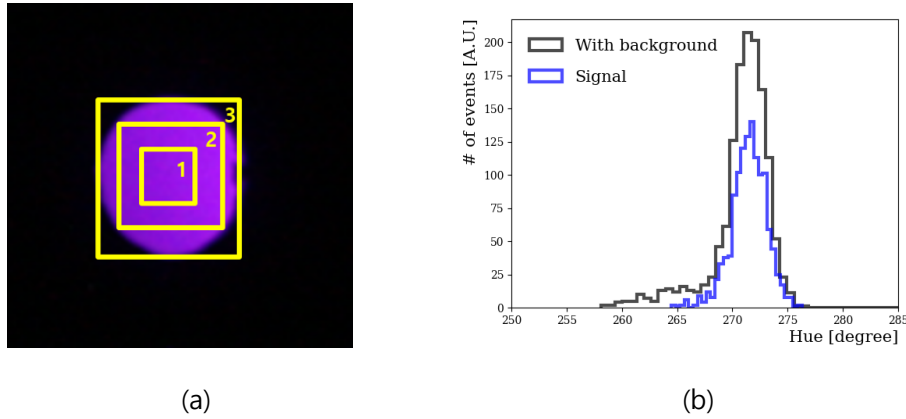


Figure 9. LED distribution by wavelength

Figure 10 shows the result of H-W mapping relation using LED light source for the wavelength around 400 nm. We only focused on those wavelength region, since most of fluors used in the particle physics emit light in this wavelength range. The thickness of the line represents the deviation of hue value obtained by Gaussian fitting with different exposure times for those wavelength region. Below 400 nm, the error band is relatively large compared to other range due to the poor camera response. Using this relationship, emission wavelength of fluors can be estimated.

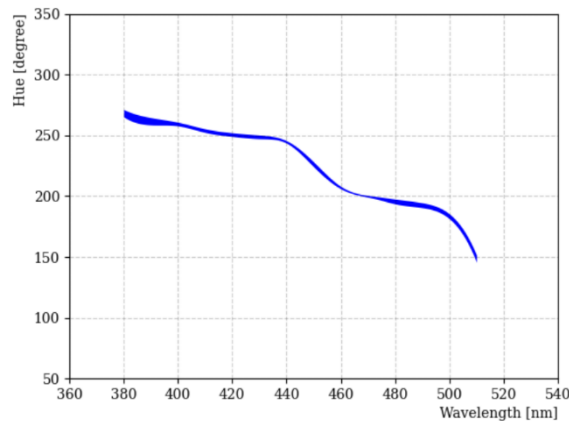


Figure 10. H-W curve with Canon EOS 450D using CFA technology for the wavelength around

400nm

5.2. Image analysis of liquid scintillator

For the background rejection, experiments were performed in a dark room. Pictures were taken with the CMOS camera approximately 50 cm in front of the LS sample container. The camera was focused at the expected point by taking several pictures in advance and efforts were made to place the camera as perpendicular as possible to the front of the sample plane. The angle between the camera and the LS sample container needed to be well aligned. By marking the coordinates of each point, they were as square to each other as possible. In addition, the refraction effect was examined. A LS sample was placed in the center of the camera view and photographed without magnification. After a photo was taken with a digital camera, users can choose lossless raw data or lossy compressed data formats. In our case, we used a jpeg format corresponding to the second case. Only a certain number of pixels in the digital world were used through down sampling, discrete Fourier integral transformation, and encoding processes. Then, R, G, and B values of each pixel were stored in a color look up table with a scale of 256, since our digital camera used 8 bit. Schematic diagram for taking digital image photo was shown in figure 11. To prevent external background lights from entering the camera lens, a wall between the camera and LS sample was installed. The digital camera was positioned at 90o angle to the axis of the beam, so the light emitted from the UV lamp did not enter the camera directly. In addition, we tried to prevent any stray lights from entering the camera. Figure 12 shows a light image emitted from the LS sample. These images were taken with a digital camera using a few seconds exposure time. Only those pixels whose V value in the HSV model was greater than roughly 60% were selected to remove background. This boundary line was indicated as a rectangular box. The fourth box was selected for the analysis.

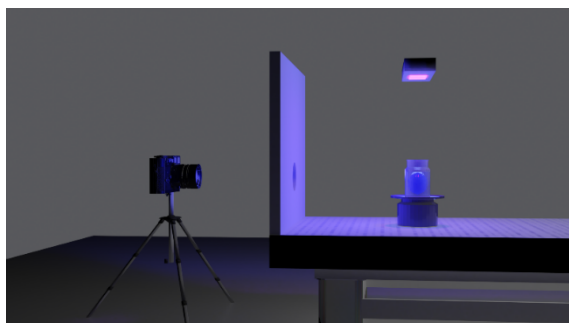


Figure 11. Illustration of the experimental setup for taking digital images. A digital camera was remotely controlled.

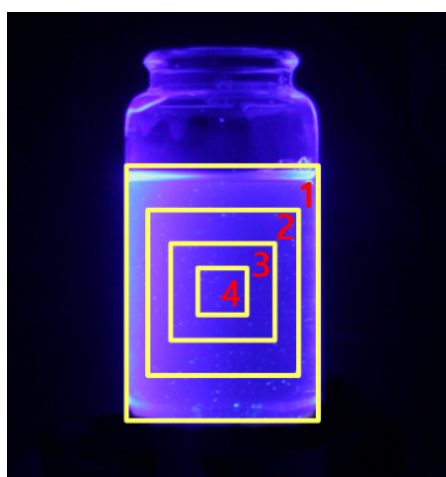


Figure 12. Only those pixel regions with a V value above a certain level were selected, and their boundary lines were displayed as a rectangular box area.

Various LS samples were illuminated by an UV lamp at ~250, 310, and 360 nm. The light emitted from LS samples can be clearly seen, as shown in figure13. From left to right, pure water (H₂O), PPO, POPOP, bis-MSB, and 6-FAM samples. The far left was a sample filled with water. Pure water did not emit any light. The far right was a green dye sample. For this, 6-FAM, green dye fluor was used. 6-FAM is a fluorescent dye with an absorption wavelength of ~490 nm and an emission wavelength of near 520 nm.



Figure 13. Light is emitted from five samples illuminated by UV lamps. From left to right, pure water (H_2O), PPO, POPOP, bis-MSB, and 6-FAM samples. Pure water did not emit any light. A cylindrical quartz container was filled with WbLS using Triton X100 surfactant.

Figure 14 shows the distribution of blue component of each sample in color space as a function of the pixel intensity value. Because the fluors used emit light in the blue wavelength region, blue pixel values are dominant among R, G, and B values. Our LS contains three fluors substances that convert from UV to visible light, PPO, POPOP, and bis-MSB. In addition, a green pixel intensity of 6-FAM can be clearly seen, rather than blue pixel intensity. Figure 15 shows the extracted emission spectrum of PPO, PPO+POPOP, PPO+bis-MSB according to H-W relation. The difference of emission spectrum between PPO and POPOP (bis-MSB) fluors in the blue-like color region can be clearly distinguished. Compared to the expensive commercial UV/Vis spectrophotometer scanning roughly 200 to 700 nm, the current method has the disadvantage that it cannot measure the UV region below ~ 380 nm and up to 1 nm increment level. However, this method has sufficient potential to estimate the emission spectrum in the visible region. Unlike spectrophotometer, there is no need to perform extra steps such as extracting samples from a sealed liquid container, inserting and removing cuvette from the spectrophotometer, and thorough cleaning after measurement.

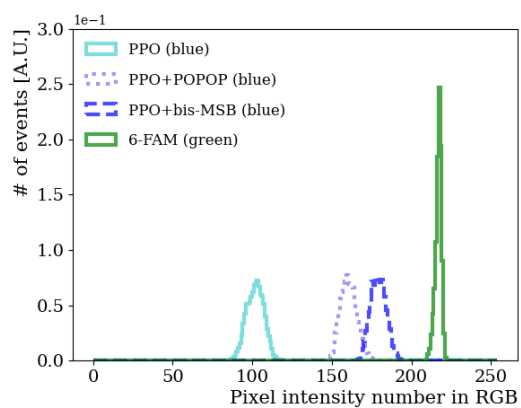


Figure 14. Dominant components were extracted from the photographed images of PPO, PPO+POPOP, PPO+bis-MSB, 6-FAM

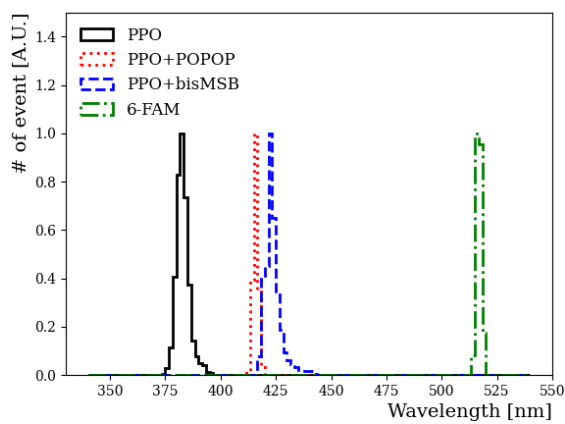


Figure 15. The extracted emission spectra of PPO, POPOP, bis-MSB, and 6-FAM based on H-W relation

6. Summary

We investigated the H-W relationship using a digital camera based on CMOS sensor technology. To date, in the red or green color bands, it was measured relatively well, but there were no measurement results in the blue color region. Most of the signals generated in experimental particle physics or neutrino physics are read by PMTs, and the maximum QE of bi-alkali PMTs lies in the blue region. This is the reason why we are interested in the blue region of the wavelength and pay attention to the corresponding H-W relation. There are several types of image sensors. Among them, in our study a camera employing CMOS sensors technology was used. If the RGB value of each pixel is known, the HSV value can be obtained from the RGB information. Then H value information can be converted to wavelength. An H-W value was measured around 400 nm wavelength using LED. A non-linear relation in H-W was investigated for the wavelength around 400 nm. In addition, photo images of UV lights onto the LS sample were taken by a CMOS CFA-based digital camera. We considered a method to easily identify the fluor contents by analyzing the emission spectrum with an adequate precision level. The emission spectrum difference of PPO, POPOP, bis-MSB, 6-FAM samples could clearly be seen. This simple method was sufficient to identify the fluor contents in the LS through the demosaicing process in the Bayer CFA approach. In summary, we hope that our image analysis will be used in the future particle detector technology or other related fields.

References

- [1] M. Ito *et al.*, "Application of amorphous oxide TFT to electrophoretic display," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 354, no. 19, 2777 (2008)
- [2] N. M. Amer, "The effects of homogeneous magnetic fields on developments of *tribolium confusum*," Ph.D. dissertation, Radiation Lab., Univ. California, Berkeley, Tech. Rep. 16854, (1995)
- [3] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, Eds. San Francisco, CA, USA: Academic, 47 (1977)
- [4] T. Mei and T. Yang, "Circuit and method for average-current regulation of light-emitting diodes," U.S. Patent 7 898 187 B1, 2011, Mar. 1, 2012
- [5] T. Smith *et al.*, "The C.I.E. colorimetric standards and their use," *Trans. Opt. Soc.*, vol. 33, 73 (1931)
- [6] CIE. Colorimetry; CIE 15:2018; CIE Central Bureau: Vienna, Austria, 2018
- [7] A.R. Smith, "Color Gamut Transform Pairs," *ACM SIGGRAPH Comput. Graph*, vol. 12, 12 (1978)
- [8] De Oliveira *et al.*, "A handheld smartphone-controlled spectrophotometer based on hue to wavelength conversion for molecular absorption and emission measurements," *Sensors and Actuators B*, vol. 238, 1084 (2017)
- [9] T.J. McGregor *et al.*, "Laser-based volumetric colour-coded three-dimensional particle velocimetry," *Opt. Lasers Eng*, vol. 45, 882 (2007)
- [10] T.J. McGregor *et al.*, "Three Dimensional Particle Image Velocimetry using Colour Coded Light Sheets," In *Proceedings of the Fourth Australian Conference on Laser Diagnostics in Fluid Mechanics and Combustion*, Adelaide, Australia, 7-9 December 2005
- [11] B. Bruininks *et al.*, "An Inexpensive 3D Printed Periscope-Type Smartphone-Based Spectrophotometer for Emission, Absorption, and Fluorescence Spectrometry," *J. Chem. Educ.*, vol. 99, 2168 (2022)
- [12] M.H. Bornstein *et al.*, "The Categories of Hue in Infancy," *Science*, vol. 191, 201 (1976)
- [13] A.K. Romney *et al.*, "The distribution of response spectra in the lateral geniculate nucleus

compared with reflectance spectra of Munsell color chips," Proc. Natl. Acad. Sci. USA, vol. 102, 9720 (2005)

[14] B.R. Conway *et al.*, "A different point of hue," Proc. Natl. Acad. Sci. USA, vol. 102, 10761 (2005)

[15] R.W. Pridmore *et al.*, "Cone Photoreceptor Sensitivities and Unique Hue Chromatic Responses: Correlation and Causation Imply the Physiological Basis of Unique Hues," PLoS ONE, vol. 8, e77134 (2013)

[16] B.J. Deane *et al.*, "Hue Saturation and Lightness of Surface Colors with Chromatic Illumination," J. Opt. Soc. Am, vol. 30, 2 (1940)

[17] C. Buck *et al.*, "Light propagation and fluorescence quantum yields in liquid scintillators," J. Instrum, vol. 10, P09007 (2015)

[18] D. Motta, "Optical properties of bialkali photocathodes," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, vol. 539, 217 (2005)

[19] K.S. Park *et al.*, "Construction and properties of acrylic vessels in the RENO detector," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, vol. 686, 91 (2012)

[20] A. Pipke *et al.*, "Moser," Nucl. Instr. Meth A432, vol. 392, (1999)

[21] B.C. Kim *et al.*, "Measurement of the density of liquid scintillator solvents for neutrino experiments," New Physics, vol. 6(8), 759 (2011)

[22] S.H. So *et al.*, "Investigation of the Physical and the Optical Properties of Various Base Solvents for the Liquid Scintillator in a Neutrino Detector," J. Korean Phys. Soc, vol. 62(1), 26 (2013)

[23] I.S. Yeo *et al.*, "Measurement of the refractive index of the LAB-based liquid scintillator and acrylic at RENO," Phys. Scripta, vol. 82, 065706 (2010)

[24] M. Yeh, "Studies of Gd-LS at BNL for Reactor Neutrino θ_{13} Measurement", US/UK Reactor θ_{13} Workshop, 2004

[25] R. Ramanath *et al.*, "Demosaicking methods for Bayer color arrays," Journal of Electron Imaging, vol. 11, 306 (2002)

[26] B.K. Gunturk *et al.*, "Demosaicking: Color filter array interpolation", IEEE Signal. Process. Mag,

vol. 22, 44 (2005)

[27] L. Anzagira et al., "Color filter array patterns for small-pixel image sensors with substantial cross talk", J. Opt. Soc. Am. A, vol. 32, 28 (2014)

[28] CIE. Commission internationale de l'Eclairage Proceedings. 1931; Cambridge University Press: Cambridge, UK, (1932)

[29] T. Smith *et al.*, "The C.I.E. colorimetric standards and their use," Trans. Opt. Soc, vol. 33, 73 (1931)

[30] Smith, A.R. Color Gamut Transform Paris. In Proceedings of the 5th Annual conference on computer graphics and interactive techniques, New York, NY, USA, 23-25 August 1978

[31] E.R. Fossum *et al.*, "CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 44, 1689 (1997)

[32] D. Uwaerts *et al.*, "Recent developments in high-end CMOS image sensors," Int. Conf. Space Opt, vol. 30, 10569 (2017)

[33] Fontaine, R. Recent innovations in CMOS image sensors. In Proceedings of the 2011 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, Saratoga Springs, NY, USA, 16–18 May 2011

[34] Yokogawa, S. Nanophotonics contributions to state-of-the-art CMOS Image Sensors. In Proceedings of the 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 7–11 December 2019

[35] M. Yokogawa *et al.*, "High-Speed Imaging Using CMOS Image Sensor with Quasi Pixel-Wise Exposure," IEEE Trans. Comput. Imaging, vol. 6, 463 (2020)

[36] Szeliski, R. Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed.; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, (2022)

[37] Maitre, H. From Photon to Pixel, 2nd ed.;Wiley: Hoboken, NJ, USA, (2017)

[38] H. Maitre, "Color filter array for CCD and CMOS image sensors using a chemically amplified, thermally cured, pre-dyed, positive tone photoresist for 365 nm lithography," Proc. SPIE, vol. 3678, 1083 (1999)

[39] T.J. McGregor *et al.*, "Laser-based volumetric colour-coded three-dimensional particle

velocimetry," *Opt. Lasers Eng*, vol. 45, 882 (2007)

[40] P. Teikari *et al.*, "An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research," *J. Neurosci. Methods*, vol. 211, 227 (2012)

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

Volume 19, No. 1

ISSN 2288-050X

2022년 12월 23일 인쇄	(비매품)	발행인	문 동 호
2022년 12월 27일 발행		편집인	문 동 호
		인쇄처	전대 자연대 복사 / 운화복사
		발행소	전남대학교 우주소립자연연구소

(61186) 광주광역시 북구 용봉로 77 (용봉동)
전남대학교 자연과학대학 4호관 우주소립자연연구소
전화 : 062-530-3354

Website : <http://iuep.jnu.ac.kr>

CONTENTS

Volume 19, No. 1

Journal of Universe and Elementary Particles December 2022

Measurement of cosmogenic ${}^9\text{Li}$ and ${}^8\text{He}$ production rates at RENO	Hyun Gi Lee	01
액체 섬광체로 사진 이미지 분석을 이용한 색상-파장 관계	최지원, 주경광	15