

Measurement of the Neutron Capture Time on Hydrogen at the RENO

Chang Dong SHIN · Kyung Kwang JOO*

Institute for Universe & Elementary Particles, Department of Physics,
Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

(Received 6 July 2015 : revised 7 August 2015 : accepted 7 August 2015)

RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) uses the inverse beta decay ($\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$, IBD) process to measure the neutrino mixing angle (θ_{13}) at the Hanbit nuclear power plant. The reactor antineutrinos are detected through IBD followed by neutron capture. A neutron can be captured by gadolinium (Gd) or hydrogen in the detector. In the case of hydrogen capture, the capture time is longer than it is for the case of Gd capture, and the signal distribution differs with the region in the detector. And, the neutron capture time of data is affected by background. In this paper, the neutron capture time by hydrogen is estimated by using a Monte Carlo simulation (MC), and then the result is compared with the experimental data.

PACS numbers: 13.15.+g, 14.60.Pq

Keywords: RENO, Neutrino, IBD, Hydrogen, Neutron capture time, Neutrino oscillation parameter (θ_{13})

RENO 실험에서 수소에 의한 중성자 포획시간 측정

신창동 · 주경광*

전남대학교 물리학과 우주소립자 연구소, 광주 61186

(2015년 7월 6일 받음, 2015년 8월 7일 수정본 받음, 2015년 8월 7일 게재 확정)

반전자중성미자의 진동변환상수 (θ_{13})를 측정하는 RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) 실험은 역베타붕괴 (Inverse Beta Decay, $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$, IBD) 과정을 이용한다. 중성자의 경우 검출기 내부에서 가돌리늄 (Gd)과 수소에 포획되는 두 가지 과정이 있다. 수소에 포획되는 경우 가돌리늄에 포획되는 경우보다 긴 포획시간을 갖는다. 이에 따라 검출기의 영역에 따라 포획시간의 분포도 달라진다. 또한 데이터의 경우 백그라운드의 영향으로 중성자의 포획시간의 분포가 영향을 받기 때문에 직접적인 측정이 어렵다. 이 논문에서는 몬테카를로 시뮬레이션 (MC)을 이용하여 중성자 포획시간을 확인하고 데이터에서 측정된 값과 비교해 보았다.

PACS numbers: 13.15.+g, 14.60.Pq

Keywords: RENO, 중성미자, 역베타붕괴, 수소, 중성자포획시간, 진동변환상수 (θ_{13})

*E-mail: kkjoo@chonnam.ac.kr



I. 서론

RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) 실험은 한빛 원자력 발전소의 원자로의 핵분열과정에서 생성되는 반전자 중성미자를 근거리 검출기 (near detector, ND) 와 원거리 검출기 (far detector, FD)에서 일어나는 역베타붕괴 과정을 이용하여 측정한다. 역베타붕괴 과정에서 나오는 중성자가 가돌리늄에 포획되는 경우에 대해서는 2012년 중성미자 진동변환상수 (θ_{13}) 측정 결과를 발표하였다 [1,2]. RENO 검출기에서는 중성자가 수소에 포획될 경우의 이벤트도 상당수가 존재한다. 이에 따라 수소포획 된 경우에 대하여 분석을 진행 중에 있으며 이를 통하여 가돌리늄에 대한 결과와 비교하여 확인할 수 있다. 여기서 중성자의 포획시간은 백그라운드가 많은 수소포획의 경우 중요한 변수로 작용한다 [3,4]. 이에 대한 특성을 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 확인하고 데이터에서 얻은 값과 비교하였다.

II. 중성자 포획 시간

1. 중성자 포획 과정

Fig. 1과 같이 반전자 중성미자는 RENO 검출기 내부에서 양성자와 만나 역베타붕괴 반응을 일으킨다. 이 과정에서 생성된 양전자 (positron)는 쌍소멸 (pair annihilation) 하여 신호를 발생하고, 중성자의 경우 약간의 시간동안 이동하여 검출기 내부의 가돌리늄 및 수소에 포획하여 신호를 발생하게 된다 [5]. 이 과정에서 양전자와 중성자 신호의 시간차이를 통하여 중성자의 포획 시간 (capture time)을 측정할 수 있다. 중성자의 포획시간은 산란단면적과 관계되는데 가돌리늄의 경우 양성자에 비해 약 16만 배 더 큰 산란단면적을 갖고, 중성자가 수소에 포획된 경우 보다 긴 포획시간을 갖고있다 [6,7]. RENO 검출기는 Fig. 2와 같이 target, γ -catcher, buffer, veto의 4가지 영역으로 구성되어 있다. Target 영역의 경우 가돌리늄이 용해된 액체섬광검출 용액 (Gadolinium-loaded Liquid Scintillator, GdLS)으로 구성되어 중성자가 가돌리늄 혹은 수소에 포획된 경우 두 가지 경우가 모두 존재하지만 γ -catcher 영역의 경우 액체섬광검출용액 (liquid scintillator, LS)으로 구성되어 수소에 포획된 경우의 이벤트만 존재한다 [5].

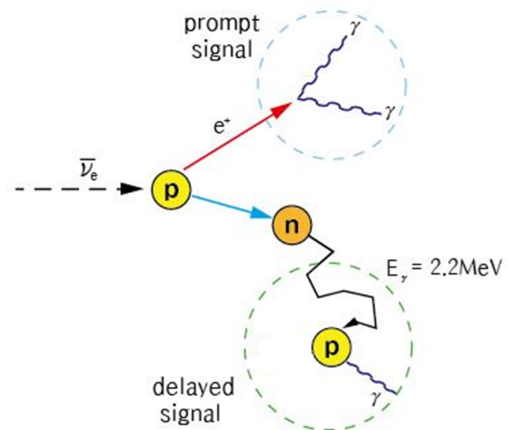


Fig. 1. (Color online) Neutron capture on hydrogen.

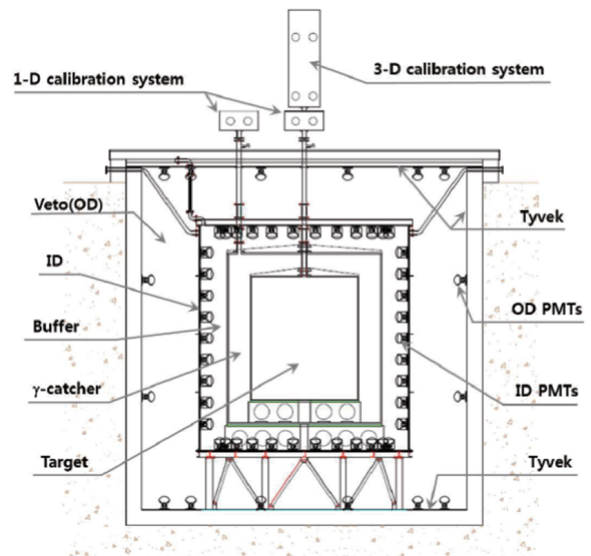


Fig. 2. (Color online) A schematic view of RENO detector. RENO detector consists of four layers: target, γ -catcher, buffer and veto.

2. 몬테카를로 시뮬레이션

RENO 검출기에서 중성자 포획시간 측정을 위해 몬테카를로 시뮬레이션 이용하여 먼저 검출기 영역별로 포획시간을 확인하여 보았다. 몬테카를로 시뮬레이션의 경우 역베타붕괴 이벤트를 생성한 후 GLG4SIM을 이용하여 RENO 검출기 환경을 시뮬레이션 하였다 [8-10].

Fig. 3은 수소에 포획된 이벤트의 위치분포를 검출기 반지름의 제곱 (ρ^2) 과 수직 높이 (Z) 에 대하여 색깔을 통해 이벤트의 밀집도를 나타내었고, 붉은색에 가까울수록 많은 이벤트가 존재함을 나타낸다. Target 영역의 경우 약 90%가 가돌리늄에 포획에 되어 γ -catcher 영역에 비해 작은 양만이 존재하는 것을 확인 할 수 있다

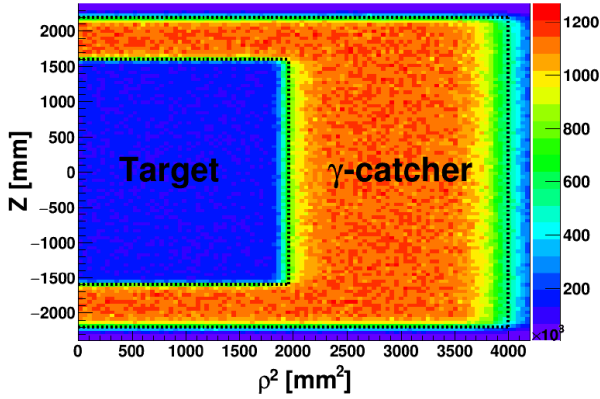


Fig. 3. (Color online) Vertex distribution of hydrogen capture events.

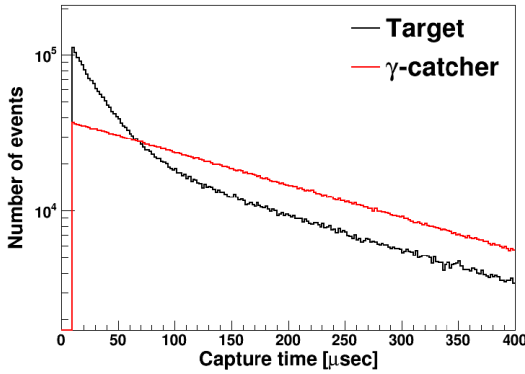


Fig. 4. (Color online) Neutron capture time by hydrogen in the MC.

[11]. 그리고 γ -catcher 영역 바깥으로도 중성자가 포획되기 전까지 이동으로 인해 일부 이벤트가 존재하나 액체섬광검출용액으로 채워져 있지 않기에 신호가 검출되지는 않는다.

중성자의 포획시간은 기본적으로 역베타 붕괴 후 생성된 양전자의 경우 매우 짧은 시간 내에 신호를 내는 것을 고려하여 양전자 신호와 중성자 신호의 시간차이를 통하여 측정할 수 있다. 이를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션의 중성자 포획시간에 대한 분포를 확인하면 Fig. 4의 경우 target 영역에서는 포획시간이 약 60 μsec 이전과 이후로 빠르게 감소하는 성분과 천천히 감소하는 두 가지 성분이 섞여있는 분포를 보인다. 이는 수소포획의 경우 비교적 포획시간이 긴 특성을 갖지만, target 영역에서는 가돌리늄이 용해되어 있어 수소에 포획되기 위해서는 가돌리늄과 비슷한 빠른 시간에 포획된 이벤트가 주로 존재하여 보이는 현상으로 이해하고 있다 [5]. γ -catcher 영역의 경우 수직축을 로그 스케일로 확인할 시 직선처럼 감소하는 것을 볼 수 있고 이를 지수함수를 이용한 피팅을 통하여 포획시간을 측정할 수 있다 [11].

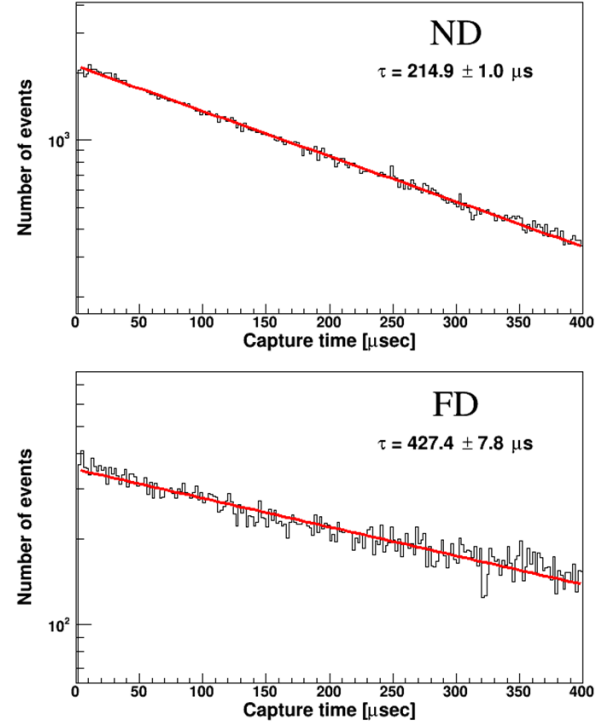


Fig. 5. (Color online) Neutron capture time before background subtraction in the ND (top) and FD (bottom).

3. 중성자 포획시간 측정

데이터의 경우도 몬테카를로 시뮬레이션과 같이 양전자와 중성자의 시간차이를 이용하여 수소에 의한 중성자의 포획시간을 측정할 수 있다. 한 가지 문제점은 Fig. 5에서와 같이 데이터의 경우 백그라운드가 포함되어 있어 정확한 측정이 어려운 점이 있다. 원거리의 경우 비교적 많은 백그라운드로 인해 포획시간이 약 400 μsec 수준으로 크게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 수소포획 이벤트의 경우 외부에서 들어오는 빛으로 인한 accidental background가 가장 큰 비율을 차지한다. 이를 이용해서 백그라운드의 양을 알면 간접적으로 역베타붕괴 이벤트에 의한 중성자 포획시간을 측정할 수 있다.

$$f(x) = a_1 \cdot e^{-\frac{x}{\tau_1}} + a_2 \cdot e^{-\frac{x}{\tau_2}} \quad (1)$$

중성자의 포획시간 분포, $f(x)$ 는 식 (1)과 같이 normalize factor (a_1, a_2), capture time (τ_1), background rate (τ_2)로 표현할 수 있다 [12]. 여기서 왼쪽 항은 역베타붕괴 이벤트, 오른쪽 항은 백그라운드를 나타낸다. 만약 백그라운드의 양을 알고 있다면, a_2 를 식 (2)와 같이 역베타붕괴 이벤트수 (N_{IBD})와 백그라운드 이벤트수 (N_{BKG})로 나타낼 수 있다.

$$a_2 = \frac{a_1 \tau_1 (1 - e^{-\frac{400}{\tau_1}})}{N_{IBD}/N_{BKG} \cdot \tau_2 (1 - e^{-\frac{400}{\tau_2}})} \quad (2)$$

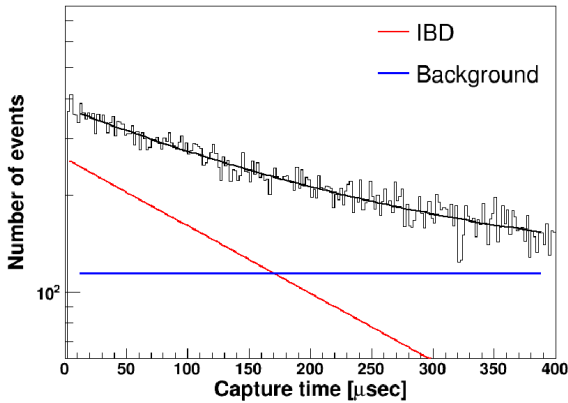


Fig. 6. (Color online) Fitting plot with background of FD.

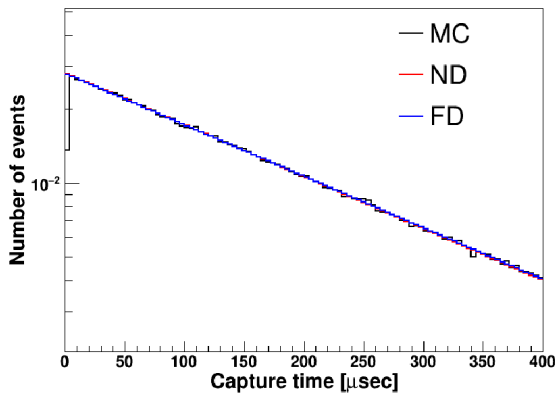


Fig. 7. (Color online) Comparison of neutron capture time between MC and data.

Table 1. Neutron capture time on hydrogen in the ND and FD.

	Capture time (μsec)
MC	206.0 ± 0.5
ND	205.3 ± 1.0
FD	206.8 ± 4.3

이 식을 이용하여 중성자 포획시간을 피팅하면 Fig. 6와 같이 역베타붕괴 이벤트와 백그라운드를 성분의 분포를 각각 얻어 낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 원·근거리 모두 중성자 포획시간 (τ_1)을 얻었다.

Fig. 7은 역베타붕괴 이벤트 성분만을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션과 데이터의 포획시간 분포를 비교하였고, Table 1에 측정된 값을 정리하였다.

III. 요약

RENO 검출기의 γ -catcher 영역에서 중성자가 수소에 포획된 경우에 대하여 포획시간의 분포 및 값을 확인하

였다. 데이터의 백그라운드 성분을 제거하여, 몬테카를로 시뮬레이션과 원·근거리 검출기 모두 비슷한 분포를 보이는 것을 확인 하였고, 측정값 또한 약 $206 \mu\text{sec}$ 에서의 일치하는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2010-0007850)으로 설립된 한국중성미자연구센터와 기초연구사업지원, Samsung Science & Technology Foundation (SSTF-BA1402-06)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- [1] J. K. Ahn, S. Chebotaryov, J. H Choi, S. Choi and W. Choi *et al.*, (RENO Collaboration), Phys. Rev. Lett. **108**, 191802 (2012).
- [2] B. R. Kim and K. K. Joo, New Phys.: Sae Mulli **62**, 968 (2012).
- [3] F. P. An, A. B. Balantekin, H. R. Band, W. Beriguete and M. Bishai *et al.*, (Daya Bay Collaboration), Phys. Rev. D. **90**, 071101 (2014).
- [4] Y. Abe, C. Aberle, J. C. dos Anjos, J. C. Barriere and M. Bergevin *et al.*, Phys. Lett. B. **723**, 66 (2013).
- [5] J. K. Ahn, S. Chebotaryov, J. H Choi, S. Choi and W. Choi *et al.*, (RENO Collaboration), arXiv:hep-ex/1003.1391 (2010).
- [6] V. F. Sears, Neutron News **3**, 3 (1992).
- [7] W. C. Chung, T. I. Ro, G. K. M. Igashira and T. Ohaski, J. Korean Phys. Soc. **50**, 1592 (2007).
- [8] M. Goossens, Trans. Nucl. Sci. **57**, 428 (2010).
- [9] C. D. Shin and K. K. Joo, New Phys.: Sae Mulli **63**, 1011 (2013).
- [10] I. S. Yeo and K. K. Joo, New Phys.: Sae Mulli **64**, 912 (2014).
- [11] C. D. Shin and J. S. Jang, New Phys.: Sae Mulli **62**, 979 (2012).
- [12] I. S. Yeo and K. K. Joo, New Phys.: Sae Mulli **62**, 974 (2012).