

## Physics at the SND@LHC

Ki-Young CHOI

Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

Sung Hyun KIM · Kang Young LEE\* · Byung Do PARK · Jong Yoon SOHN · Chun Sil YOON

Department of Physics Education & Research Institute of Natural Science,  
Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

Yeong Gyun KIM

Department of Science Education, Gwangju National University of Education, Gwangju 61204, Korea

Kyong Sei LEE

Department of Physics, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received 30 November 2021 : revised 07 January 2022 : accepted 11 January 2022)

SND@LHC is a new LHC experiment that measures neutrino production at the LHC and searches for feebly interacting particles. The experiment detects neutrinos with energies of 100 GeV – TeV using a hybrid detector of ECC composed of emulsion interleaved with tungsten target followed downstream by a muon system. SND@LHC measures neutrino production cross sections for three flavors and allows the examination of neutrino interactions in a pseudo-rapidity region of  $7.2 < \eta < 8.6$ . The detector also functions to search for feebly interacting particles. SND@LHC is operated to collect  $150 \text{ fb}^{-1}$  of data for three years during Run 3 of the LHC to observe about 2,000 neutrinos.

Keywords: Neutrino, Dark matter, Nuclear emulsion, LHC, Forward physics

## SND@LHC의 물리학

최기영

성균관대학교 자연과학대학 물리학과, 수원 16419, 대한민국

김성현 · 이강영\* · 박병도 · 손종윤 · 윤천실

경상국립대학교 사범대학 물리교육과 & 기초과학연구소, 진주 52828, 대한민국

김영균

광주교육대학교 과학교육학과, 광주, 61204, 대한민국

이경세

고려대학교 이과대학 물리학과, 서울 02841, 대한민국

(2021년 11월 30일 받음, 2022년 1월 07일 수정본 받음, 2022년 1월 11일 게재 확정)



SND@LHC는 LHC 충돌에서 발생하는 중성미자를 연구하고, 약하게 상호작용하는 물질을 찾는 새로운 LHC 실험이다. 이 실험에서는 원자핵건판과 텅스텐 표적을 교대로 쌓은 ECC (Emulsion Cloud Chamber)와 뮤온 검출기로 이루어진 복합검출기를 이용해서 100 GeV에서 TeV에 이르는 에너지의 중성미자를 직접 검출한다. SND@LHC는  $7.2 < \eta < 8.6$ 의 의사 신속도 (pseudo-rapidity) 영역에서 모든 플레이버의 중성미자의 산란 단면적을 측정하고 관련된 물리학을 연구한다. 또한 가벼운 암흑물질의 후보가 될 수 있는 약하게 상호작용하는 물질이 존재한다면 본 검출기로 이러한 물질을 직접 검출할 가능성도 있다. 3년 동안의 LHC 3차 가동 기간에 총 누적 광도는  $150 \text{ fb}^{-1}$ 로 예상되며 그렇게 되면 SND@LHC에서 약 2,000개의 중성미자를 관측할 것으로 기대된다.

Keywords: 중성미자, 암흑물질, 원자핵건판, LHC, 전방위물리학

## I. 서 론

유럽입자물리연구소 CERN의 LHC는 7 TeV로 가속된 두 양성자를 충돌시키는 사상 최대의 가속기 충돌장치다. LHC 충돌에서 일어나는 현상은 각각의 목적에 맞도록 설계된 여러 검출기를 통하여 관찰되고 기록되며, 물리학자들은 이렇게 얻은 데이터를 분석해서 표준모형이 예측하지 못하는 새로운 현상을 찾고 표준모형을 더욱 정밀하고 깊이 이해하려고 한다. 아직까지 LHC에서 거대한 충돌에너지에 의해 만들어지는 무거운 질량의 새로운 입자는 발견되지 않았다. 이렇게 충돌에너지가 질량으로 전환되어 만들어지는 무거운 입자들은 모든 방향으로 발생할 수 있으므로 주로 양성자 빔의 수직 방향에서 탐색되고 있다. 한편 LHC에서는 강한 상호작용에 의해 양성자 빔의 축 방향으로 많은 입자들이 만들어진다. 사실상 LHC 충돌의 총 산란 단면적 100 mb의 대부분은 축 방향으로 발생하는 반응이 차지한다. SND@LHC는 LHC 충돌에서 이렇게 축 방향으로 발생하는 입자들로부터 만들어지는 높은 에너지의 중성미자와 가벼운 암흑물질(Light Dark Matter, LDM)의 후보가 될 수 있는 상호작용이 매우 작은 입자들(Febly Interacting Particles, FIP)을 연구하기 위한 새로운 실험이다 [1].

SND@LHC 실험의 배경을 간단히 설명하도록 한다. 2015년에 CERN의 SPS 가속기에서 나오는 400 GeV 양성자 빔을 표적에 때려 아직 발견되지 않은 ‘숨겨진 입자’(Hidden particle)를 만들어내고, 입자가 100 미터 가량의 먼 거리를 지나간 뒤에 붕괴하면 이를 검출기에서 직접 관측하고자하는 매우 참신하고 야심만만한 실험인 SHiP이 제안되었다 [2,3]. 하지만 2020년 유럽 입자물리학 전략회의 (European Strategy of Particle Physics)에서 CERN은 새로운 표적 실험을 위한 시설 (Beam Dump Facility)에 대한 연구와 개발을 계속 진행할 것이지만 당장 건설을 시작하지는 않기로 결정했다. 이에 따라 새로운 터널을

필요로 하는 SHiP 실험 역시 시작이 미루어지게 되었다. 상황이 이렇게 되자 SHiP 실험 그룹은 그룹의 역량을 사용해서 당장 할 수 있는 실험을 모색했고, 논의의 결과 SHiP의 SND 검출기를 이용해서 LHC에서 나오는 중성미자를 연구하는 계획인 SND@LHC 실험을 채택했다. 그룹 내부에서의 논의와 기초 연구를 거쳐 SND@LHC는 2020년 8월에 의향서 (Letter of Intent)가 제출되었고 2021년 2월에 기술제안서 (Technical Proposal)가 발행되었다. 같은 해 3월 15일에 CERN의 연구위원회 (Research Board)는 SND@LHC를 LHC의 공식적인 9번째 실험으로 승인했다. 실험이 승인됨에 따라 SND@LHC는 SHiP과 별도의 실험 그룹 (collaboration)으로 구성하기로 하고 나폴리 대학의 Giovanni de Lellis를 대표로 선출했다.

SND@LHC 검출기는 LHC에서 양성자가 충돌하는 접선 방향으로 480 미터 떨어진 위치에 설치되는데, 충돌 지점과 검출기 사이에는 암석이므로 충돌에서 발생한 입자들로부터 자연히 차폐가 된다. 따라서 상호작용을 거의 하지 않는 중성미자만이 차폐를 지나서 검출기에 도달하게 된다. 만약 FIP가 존재하고 LHC 충돌에서 만들어진다면 그러한 입자 역시 검출기에 도달할 것이다. 이러한 개념의 실험이 최근 전방위 물리학 (Forward Physics)이라는 이름으로 많은 관심을 끌고 있는데, SND@LHC는 2년 전에 승인된 FASER [4]와 함께 전방위 물리학의 선구적인 실험으로서 2021년 말에 설치되어 2022년 3월부터 시작되는 LHC의 3차 가동 (Run 3) 시기에 실험이 진행된다 [5].

SND@LHC와 FASER는 같은 개념으로 설계되었으므로 상호 검증하는 역할을 하며, 한편으로 SND@LHC는 FASER와 다른 의사 신속도 (pseudo-rapidity) 영역인 영역을 탐색하므로 상보적인 역할도 한다. 두 실험은 최초로 LHC의 중성미자를 집중적으로 연구하는 실험으로서 기존의 실험들이 다루지 않는 영역을 탐색하는 새로운 실험이며 기존 실험들에 대한 보완적인 실험이다. 두 검출기는 LHC의 ATLAS 검출기 내에 위치한 충돌 지점으로부터 각각 반대쪽 접선 방향으로 480미터 떨어져서 위치하는데,

\*E-mail: kylee.phys@gnu.ac.kr

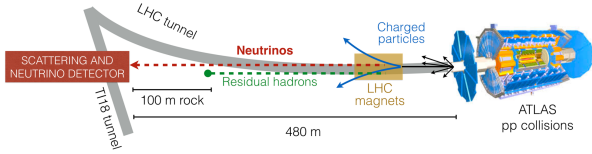


Fig. 1. (Color online) Overview of SND@LHC experiment. The detector is located 480m away from the ATLAS interaction point.

SND@LHC 검출기는 현재 사용되지 않는 TI18 터널에 설치된다.

본 논문에서는 SND@LHC 실험을 소개하고, 실험에서 연구하게 될 중성미자 현상과 연관된 물리학 및 FIP 탐구 가능성에 대해서 논의한다. 2장에서는 실험의 개요와 검출기의 개념 및 구조에 대해 소개한다. 3장과 4장에서는 SND@LHC 실험의 물리학 목표와 연구할 내용을 소개하는데, 3장에서 LHC 중성미자 물리학을, 4장에서 FIP에 관련된 새로운 물리학을 설명한다. 5장에서는 실험에 참여하는 한국 그룹을 소개하고, 한국 그룹이 기여할 부분에 대해 설명한다. 실험의 전망 및 구체적인 스케줄과 준비 상황은 6장에 요약해 놓았다.

## II. 실험의 개요

SND@LHC는 Fig. 1에서 보듯이 LHC의 양성자가 충돌하는 접선 방향으로 480 m 떨어진 TI18 터널에 위치한다. TI18 터널은 LHC와 SPS 가속기를 연결하는 공간 중 하나로 현재는 사용되지 않는다. ATLAS 충돌점을 기준으로 SND@LHC의 반대쪽에는 FASER 검출기가 대칭적으로 위치한다. LHC에서 양성자와 양성자가 충돌해서 만들어진 입자들 중 상당수는 전방과 후방의 접선 방향으로 튀어나가는데, 이 중 전하를 띤 입자 대부분은 LHC 자체의 자석으로 방향이 휘어져서 폐기된다. 또한 접선 방향으로 LHC 터널과 TI18 터널 사이의 약 100 m 쯤의 암석과 흙은 자연 차폐물 역할을 해서 남아있는 입자들을 흡수해서 걸러낸다. 결국 거의 모든 입자가 중간에 걸러지고, 중성미자와 특별히 에너지가 높은 뮤온 일부만이 검출기에 도달하게 된다.

Figure 2에 보인 SND@LHC 검출기는 세 종류의 중성미자를 검출하고 구별하는데 특화된 복합 검출기다 [1]. 그림에서 중성미자 빔은 왼쪽으로부터 들어오게 되는데, 첫 부분에는 혹시 들어오는 고에너지 뮤온을 확인해서 배제시키기 위한 뮤온 veto 검출기가 위치한다. 중성미자를 검출하는 부분은 원자핵건판을 이용하는 ECC (Emulsion Cloud Chamber)로서 원자핵건판과 표적 역할을 하는 텅스텐이

교대로 위치한다. 건판의 총 크기는  $390 \times 390 \text{ mm}^2$  이고 사용되는 텅스텐의 양은 약 830 kg 이다. ECC는 중성미자 검출에 매우 효과적인 검출기로서, 중성미자가 텅스텐 원자핵 속의 핵자와 비탄성 산란을 할 때 생성되는 렙톤을 정확히 재구성하는 역할을 한다. 특히 ECC에서는 타우 중성미자가 산란할 때 만들어지는 타우 렙톤을 직접 관찰할 수 있어서 타우 중성미자 연구에 효과적이다. 그래서 중성미자 진동에 의해서 생겨난 타우 중성미자를 직접 측정하는 OPERA 실험에서도 ECC를 사용했다. ECC 뒤에는 뮤온을 확인하기 위한 뮤온 검출기가 위치한다.

SND@LHC 검출기는 양성자 충돌 지점을 향하고 있기는 하지만 정확히 접선 방향이 아니라 Fig. 3과 같이 축 방향에서 살짝 벗어난 (축에서 300 mm) 위치에 설치된다. 검출기가 관찰하는 영역의 의사 신속도는  $7.2 < \eta < 8.6$  이다. 한편 FASER 검출기는 축을 포함하는  $\eta > 9$  영역을 관찰하므로, 이 부분이 두 실험이 차별화되는 지점이다.

## III. 중성미자 물리학

Figure 4에서 보듯 지금까지 중성미자는 주로 100 GeV 이하의 낮은 에너지 영역에서 관측되고 연구되었고, IceCube 실험에서는 최근 10 TeV에서 PeV에 이르는 영역에서 중성미자를 관측했다 [6]. 하지만 에너지가 350 GeV에서 10 TeV 사이인 중성미자는 아직 연구된 바가 없다. 충돌 에너지가 13 TeV인 LHC에서는 이 에너지 영역의 중성미자를 충분히 만들어낼 수 있으므로 LHC에서 중성미자를 연구하는 일은 새로운 영역인 350 GeV에서 TeV 에너지의 중성미자를 최초로 연구하는 일이며, 또한 거의 유일한 기회기도 하다. 중성미자의 산란 단면적은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 에너지에 따라 선형적으로 증가하므로, 본 실험과 같이 작은 규모의 검출기로도 많은 반응을 검출하는 것이 가능하다. 예를 들어, 1 TeV 에너지에서 2톤의 검출기는 100 GeV 에너지에서 200톤의 검출기와 맞먹는다.

LHC에서 중성미자는 여러 가지 원천에서 발생한다. 주요한 원천은 무거운 하드론의 렙톤 붕괴, W와 Z 보손의 렙톤-중성미자 붕괴, 그리고 파이온 및 케이온의 붕괴 등이다. SND@LHC 실험에서는  $7.2 < \eta < 8.6$  영역에서 중성미자가 발생할  $pp \rightarrow \nu X$  산란 단면적을 측정한다. SND@LHC 검출기는 중성미자의 플레이버를 구별할 수 있도록 설계되었으므로, 전체 산란 단면적 뿐 아니라 각 중성미자 플레이버에 대한 산란 단면적을 측정할 수 있다. Figure 5에 플레이버 별로 의사 신속도와 에너지 값에 따른 중성미자의 신속을 보였다. 현 단계에서 LHC 3차 가동 동안 측정된

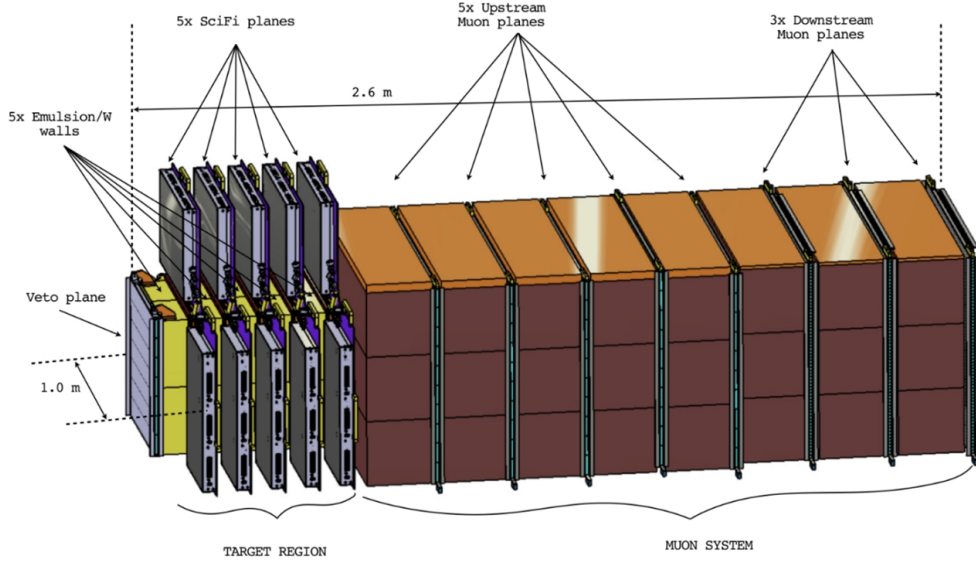


Fig. 2. (Color online) SND@LHC detector.

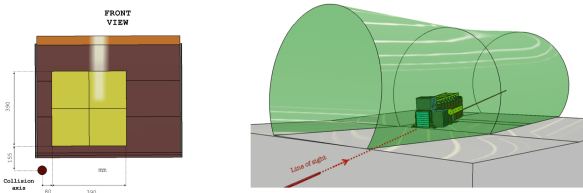
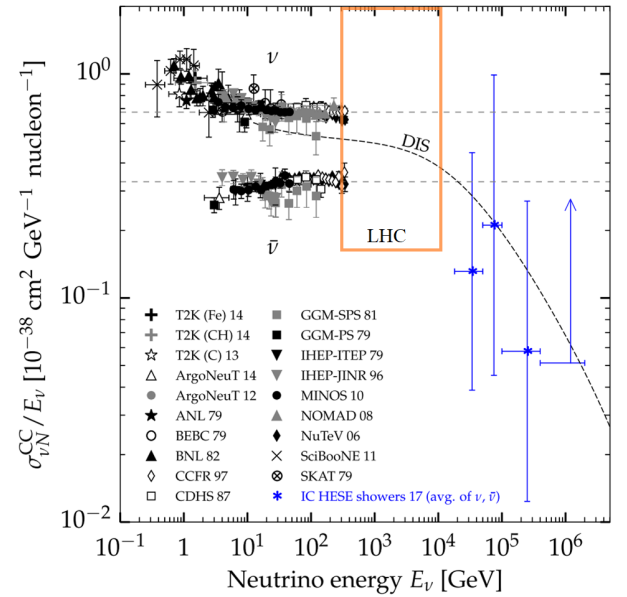


Fig. 3. (Color online) Front view of the SND@LHC detector (left) and forward beam axis to TI18 tunnel (right).

총 산란 단면적은 약 15%의 오차를 보일 것으로 예상된다. 여기서 오차의 원인은 주로 체계적 오차다.

본 실험의 에너지와 의사 신속도 영역에서 전자 중성미자는 주로  $c$  쿼크의 붕괴에서, 즉 참 하드론(charmed hadron)의 붕괴로부터 만들어진다. 그러므로 생성된 전자 중성미자를 측정하면 간접적으로 참 하드론이 얼마나 생성되었는지를 측정할 수 있다. 한편 뮤온 중성미자는 파이온의 붕괴로부터도 상당량이 만들어지므로, 중성미자의 에너지가 낮은 영역에서는 뮤온 중성미자가 대부분이다. Fig. 5와 Fig. 6에 각각의 플레이버에 대해 중성미자의 선속과 에너지 스펙트럼을 보였다. 본 실험에서 특히 흥미롭게 주목할 만한 부분 중 하나는 상당량의 타우 중성미자를 관측할 것으로 기대된다는 점이다. 타우 중성미자는 지금까지 불과 19개의 입자만 관측되었을 정도로 충분히 연구되지 못했다. LHC에서 타우 중성미자는 주로  $b$ 와  $c$  쿼크의 붕괴에서 특히  $D_s$  메손의 붕괴에서 발생하며,  $W$ 와  $Z$  보손 붕괴로부터도 만들어질 수 있다. 그러므로 이번 실험을 통해 지금까지 관찰한 전체 숫자보다도 많은 타우 중성미자를 관측하고, 이를 이용해서 새로운 연구를 할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 4. (Color online) Available measurements of the neutrino cross section [6]. The thick dashed curve is a prediction of deep-inelastic scattering, averaged between  $\nu$  and  $\bar{\nu}$ .

본 실험에서 가장 흥미로운 주제 중 하나는, 세 종류의 중성미자를 모두 측정해서 중성미자의 상호작용이 플레이버에 따라 달라지는지 여부를 직접 검증하는 일이다. 예를 들어 전자 중성미자와 타우 중성미자의 생성비는 다음과 같다.

$$R_{13} = \frac{N_{\nu_e}}{N_{\nu_\tau}} = \frac{\sum_i f_{c_i} Br(c_i \rightarrow \nu_e X)}{f_{D_s} Br(D_s \rightarrow \tau \nu_\tau)} \quad (1)$$

여기서 개수는 중성미자의 개수와 반 중성미자의 개수를



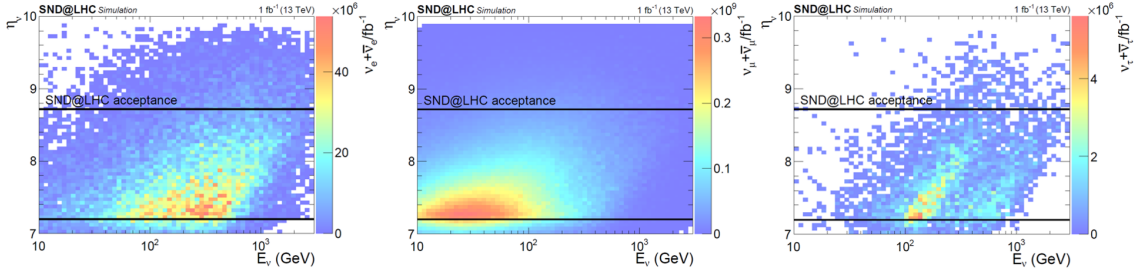


Fig. 5. (Color online) Neutrino and anti-neutrino flux as a function of neutrino energy and pseudo-rapidity for electron (left), muon (middle), and tau (right) neutrinos.

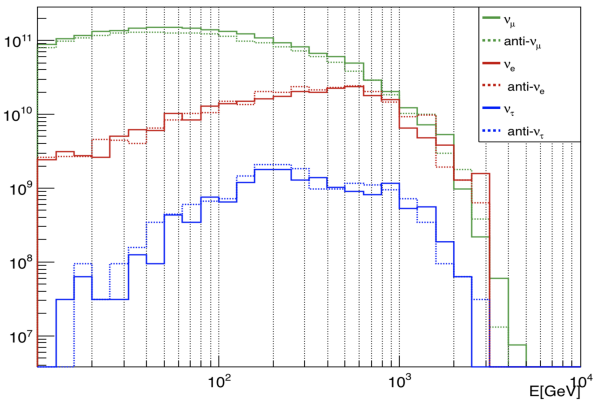


Fig. 6. (Color online) Energy spectrum of the different types of incoming neutrinos and anti-neutrinos as predicted by the DPMJET [7] / FLUKA [8] simulation. The normalization corresponds to  $150 \text{ fb}^{-1}$ .

합한 값이다.  $f_c$ 는 참 하드론의 비율이며  $Br(c_i \rightarrow \nu_e X)$ 는 각각의 참 하드론이 전자 중성미자로 붕괴할 확률이다. 여기서 타우 중성미자는 주로  $D_s$  메손에서 발생한다. 여기에 나타난 양들은 SND@LHC 검출기로 들어오는 입자들에 대한 것만 고려한다.

표준모형에서 전자와 뮤온과 타우렙톤은 질량만 다르고 게이지 상호작용 등 다른 성질은 모두 똑같은 입자다. 이를 렙톤 보편성 (lepton universality)이라고 부른다. 그러므로 렙톤 보편성이 과연 성립하는가, 즉 렙톤이 플레이버에 따라 다르게 상호작용 하는지 여부는 표준모형을 검증하는 매우 정밀하고도 결정적인 방법이다. 현재 대부분의 실험 결과는 표준모형과 일치하지만 뮤온의 이상 자기 모멘트 값을 비롯한 몇몇 실험은 표준모형의 예측값과 잘 맞지 않는 것처럼 보이고 있다 [9]. 그런데 최근 이러한 실험 결과들을 렙톤이 플레이버에 따라 다르게 행동한 결과로 설명하려는 시도가 있고, 이에 따라 렙톤 보편성을 검증하는 일에 관심이 쏠리고 있다. 표준모형에서 중성미자는 전하를 띠는 렙톤과 이중항으로 묶여있기 때문에 똑같은 상호작용을 해야 하며, 역시 렙톤 보편성을 만족해야 한다. SND@LHC에서 플레

이버에 따른 중성미자의 상호작용을 측정하게 되면 이는 렙톤 보편성을 중성미자를 통해 검증하는 최초의 시도가 되며 현재로서는 유일한 기회다. 다만 검출되는 중성미자의 수가 많지 않으므로 여기서는 렙톤 보편성을 정밀하게 검증한다기보다는, 최초로 중성미자에서 렙톤 보편성을 관찰했다는 데 의의를 두어야 할 것이다. 현 단계에서 전자 중성미자-뮤온 중성미자 사이의 비는 약 15%의 오차를 보일 것으로 예상되고, 전자 중성미자-타우 중성미자 사이의 비의 오차는 22% 이상일 것으로 예측된다 [1].

중성미자가 원자핵과 심층 비탄성 산란을 할 때, 다음과 같이 Z 보손을 매개하는 중성류 (NC) 상호작용과 W 보손을 매개하는 하전류 (CC) 상호작용의 비를 측정하면, 이는 약한 상호작용을 검증하는 새로운 방법이다.

$$P = \frac{\sum_i \sigma_{NC}^{\nu_i}}{\sum_i \sigma_{CC}^{\nu_i}} \quad (2)$$

산란 단면적은 중성미자와 반 중성미자의 산란 단면적을 합한 값이다. 이 값은 이론적으로 정확히 계산하기 어려운 부분이 상쇄되어 상대적으로 불확실성이 적은 간단한 형태가 된다. 이 NC/CC 비를 정확히 측정하면, 지금까지 전하를 띠는 렙톤으로만 측정했던 와인버그 각을 새로운 방법으로 구하게 된다.

#### IV. 매우 약하게 상호작용하는 입자 탐색

표준모형을 넘어서는 새로운 물리학 이론은 새로운 입자나 새로운 상호작용, 혹은 두 가지 모두를 포함하고 있을 것이다. LHC는 본질적으로 입자의 질량이 너무 커서 이전에는 만들어지지 못한 입자를 만들어서 발견하고자 하는 energy frontier 실험이다. 하지만 한편으로는 LHC 빔의 광도가 매우 높으므로 가벼운 입자들에 대한 intensity frontier 실험의 역할을 할 수도 있다. LHC의 주요 실험 중 하나인 LHCb 실험은  $b$  쿼크를 대량으로 만들어내는 intensity frontier 실험이라고 할 수 있다.

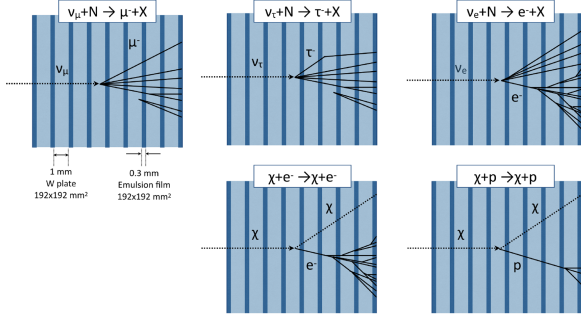


Fig. 7. (Color online) Illustration of some of the signal topologies that can be reconstructed in the SND@LHC ECC brick.

상호작용이 매우 작아서 아직 발견되지 않은 FIP를 찾는 것은 intensity frontier 실험의 중요한 목표다. 이러한 입자는 우주 물질의 대부분을 이루는 암흑물질이 될 수 있기 때문에 최근 이론과 실험 양쪽에서 매우 중요하게 연구되고 있다. 만약 이러한 입자의 질량이 그다지 크지 않다면 LHC에서 이러한 입자를 찾기 위해서는 의사 신속도가 작은 영역인 충돌의 수직방향에서 찾는 것보다 의사 신속도가 큰 영역인 충돌 전방 (forward)에서 찾는 것이 더 적합하다. 양성자가 충돌할 때 강한 상호작용에 의해 만들어져서 전방으로 튀어나가는 입자가 훨씬 많기 때문이다 [10].

가벼운 FIP는 LHC에서 여러 가지 방법으로 만들어질 수 있다. 먼저 메손이 붕괴하면서 만들어질 수 있고, 양성자의 감속방사 (bremsstrahlung)를 통해서 만들어질 수도 있으며 쿼크 수준에서 직접 드렐-얀 (Drell-Yan) 방법으로 만들어질 수도 있다. 어떤 과정이 더 중요한가는 주로 입자의 질량에 따라 달라진다.

SND@LHC에서 FIP를 검출하는 방법은 FIP가 검출기 표적의 전자나 원자핵에 산란될 때 튕겨나가는 전자나 양성자가 원자핵건판에 남기는 흔적을 찾는 것이다. 산란된 전자는 전자기 샤워를 만들고, 원자핵 속의 양성자와 탄성 충돌을 하면 튀어나가는 양성자의 궤적을 관찰할 수 있으며, 양성자와 비탄성 산란을 하면 하드론 샤워가 일어난다. Fig. 7에 여러 물리 과정이 검출기에서 관측되는 모습을 보였다. 위쪽의 그림은 중성미자가 검출기 표적에 비탄성 산란을 하는 모습이고, 아래 줄에는 FIP가 반응을 하는 모습을 보였다.

LHC 중성미자가 검출기에서 중성류 상호작용을 할 때, 탄성 산란은 비탄성 산란의 1% 이하에 불과하고 거의 대부분 비탄성 산란을 한다. 한편 FIP가 표적에 산란될 때는 FIP의 질량과 매개입자의 질량에 따라 탄성 산란이 비탄성 산란만큼 많이 일어날 수 있기 때문에, 만약 탄성 산란이 예상보다 많이 검출되면 이는 양성자보다 가벼운 새로운 입자가 반응한 증거일 가능성이 크다 [11]. 만약 FIP가 주로

비탄성 산란을 한다면 중성미자 배경사건들과 잘 분리해야 한다. 이 경우 중성류 상호작용을 하전류 상호작용과 잘 구별하는 것이 중요하다. FIP는 표준모형의 입자와 하전류 상호작용을 하지 않기 때문이다. 따라서 표준모형에서 예측되는 중성류 상호작용과 하전류 상호작용의 비를 관측값과 비교해서 새로운 현상이 나타났는지를 확인할 수 있다.

검출기에서 산란되는 FIP의 숫자는 다음과 같이 추산할 수 있다.

$$N_{\text{events}} = 2N_X^{\text{SND}} n_{\text{target}} (Z\sigma_{sc}^{\text{elastic}} + A\sigma_{sc}^{\text{DIS}}) I_{\text{target}} \quad (3)$$

여기서  $N_X^{\text{SND}}$ 는 LHC에서 만들어져서 SND@LHC 검출기로 들어오는 FIP의 개수이며 2를 곱한 것은 반입자를 고려해서다.  $n_{\text{target}}$ 은 표적의 원자 개수 밀도이고  $\sigma_{sc}$ 는 산란 단면적,  $Z$ 는 원자번호 (=양성자 수),  $A$ 는 원자량 (=양성자 수 + 중성자 수), 그리고  $I_{\text{target}}$ 은 표적의 길이이다.

다음과 같이 암흑광자  $A'_\mu$ 가 존재해서 FIP가 암흑광자를 통해 표준모형의 입자들과 상호작용하는 간단한 모형을 생각해 보자.

$$L = -\frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_{A'}^2 A'_\mu A'^\mu - \frac{1}{2}\epsilon F'_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + g_D A'_\mu J_X^\mu \quad (4)$$

여기서 암흑광자는 FIP의 흐름인  $J_X^\mu$ 와 상호작용하고, 표준모형의 광자  $A_\mu$ 와 운동항을 통해서 섞인다. Figure 8은 SND@LHC 그룹이 PYTHIA8 [12]과 MadDump 몬테카를로 제너레이터를 통해 FIP 생성을 시뮬레이션하고, 이 입자가 암흑광자를 통해 SND@LHC 검출기 표적의 전자와 산란해서 발견될 확률을 90% 신뢰도로 추산한 결과다. 이때  $m_{A'} = 3m_X$ 로 가정하고  $\alpha_D = g_D^2/4\pi$  값은 0.1로 놓았고 배경사건은 무시했다 [1].

## V. SND@LHC의 한국 그룹

SND@LHC의 한국 그룹은 한국 SHiP 그룹에 참가한 물리학자들을 중심으로 이루어졌다. 다섯 사람이 참가하는 경상국립대학교가 정식 멤버로 참여하며, 소속 인원이 한 사람 뿐인 고려대학교, 광주교육대학교, 성균관대학교는 준멤버 (associate member)로 참가한다. 따라서 한국그룹은 4개 대학의 8명의 연구원으로 구성되었다. 한국그룹은 2021년 9월에 CERN과 SND@LHC 실험을 위한 MoU를 체결했다.

현재 결정된 바에 따르면 한국 그룹이 주로 기여할 부분은 원자핵 건판의 현상 (development) 과정과 원자핵 건판 반응 분석이다. SND@LHC 실험에서 원자핵 건판은 1년에 2회 교체되므로 총 6차례 건판을 꺼내서 현상을 하게 되는데,

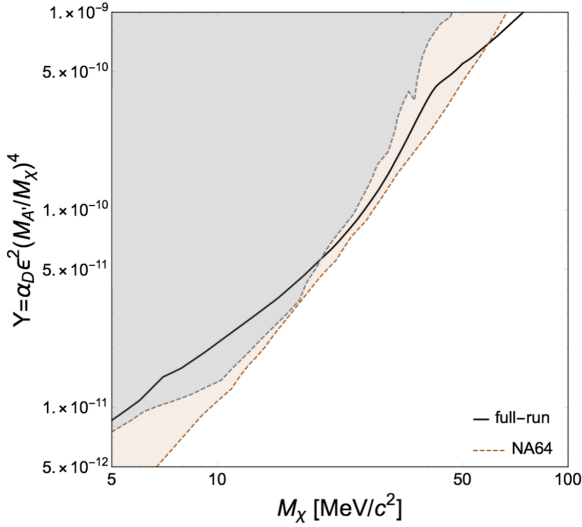


Fig. 8. (Color online) SND@LHC 90% C. L. exclusion limits in the 0-background scenario for a LDM candidate originating from the prompt decay of a dark photon, assuming as benchmark parameters  $m_{A'} = 3m_X$  and  $\alpha_D = 1$ .

이 과정에 들어가는 화학약품 등을 지원하고 연구원이 직접 현지에 가서 현상 과정을 진행할 예정이다. 또한 현상을 위한 실험실 및 암실의 조성과 유지보수에도 기여한다. 상황이 허락한다면 오랜 기간 공동으로 실험을 진행해오고 있는 나고야 그룹과 함께 원자핵 건판의 생산에도 기여하고자 한다. 이 과정을 수행하게 되면 우선은 한국그룹의 연구원이 나고야 대학에 파견되어 생산을 도울 것이다. 장기적으로는 한국에서도 자체적으로 건판을 생산할 것을 고려하고 있다.

경상대 연구실은 데이터의 분석을 위한 컴퓨터를 갖추고 있어서 데이터 분석을 자체적으로 진행할 수 있다. 또한 한국 그룹에는 여러 명의 이론물리학자가 참여하고 있으므로 SND@LHC 실험에서 새로운 입자 및 상호작용을 검증하는 문제에 대한 이론적 연구도 수행할 것이다.

## VI. 전망 및 결론

현재 SND@LHC 그룹에는 13개국의 24개 연구소 및 CERN에 소속된 180명의 인원이 참가하고 있다. SND@LHC 그룹은 2021년 12월 말 현재 검출기를 제작해서 TI18 터널에 설치했고, 필요한 지상의 실험실을 조성하며 데이터 분석을 위한 컴퓨팅 환경을 구축하고 있다. 앞으로 2022년 3월에는 원자핵 건판을 설치할 예정이다. 2022년 4월부터 LHC의 3차 가동이 시작되면 SND@LHC에서도 데이터를 얻기 시작할 것이다. 실험은 LHC 3차 가동 기간인 3년 동안 계속되며, 이 기간 동안 얻을 총 누적

광도는  $150\text{fb}^{-1}$ 이다. 이 경우 SND@LHC에서 관측할 것으로 예상되는 중성미자는 약 2,000개다.

SND@LHC는 아직까지 제대로 연구된 적이 없는 매우 큰 에너지의 중성미자를 관측하고 연구할 수 있는 최초의 기회다. 또한 아직 충분히 연구되지 않은 타우 중성미자를 포함해서 세 종류의 중성미자를 한꺼번에 비교해가면서 연구하게 될 최초의 기회기도 하다. 이러한 연구를 통해 SND@LHC는 중성미자 물리학에 크게 기여할 것으로 기대된다. 한편 이 연구를 통해서 우리는 또한 가벼운 암흑물질의 후보가 될 수 있는 입자들도 탐색하게 될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 (2021R1A2C2011003, 2020R1A2C1099546, 2021R1F1A1061717 and 2019R1A2B5B01070181)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] C. Ahdida *et al.*, SND@LHC Collaboration, Technical Proposal: SND@LHC, CERN-LHCC-2021-003/LHCC-P-016.
- [2] S. Alekhin *et al.*, [The SHiP Collaboration 79, 124201 \(2016\)](#).
- [3] M. Anelli *et al.*, The SHiP Collaboration, arXiv:1504.04956 [Physics.ins-det].
- [4] H. Abreu *et al.*, FASER Collaboration, Technical Proposal: ASER, arXiv:2001.03073 [physics.ins-det].
- [5] S. Ansarifard, Y. Farzan, Neutral Exotica at FASER and SND@LHC, arXiv:2109.13962 [hep-ph].
- [6] J. Ranft, DPMJET version II.5, arXiv:hep-ph/9911232.
- [7] A. Ferrari, P. R. Sala and A. Fass'ò, J. Ranft, FLUKA: a multi-particle transport code, CERN-2005-010.
- [8] B. Abi *et al.*, [Phys. Rev. Lett. \*\*126\*\*\(14\), 141801 \(2021\)](#).
- [9] J. L. Feng, I. Galon, F. Kling and S. Trojanowski, [Phys. Rev. D \*\*97\*\*\(3\) 035001 \(2018\)](#).

- [10] A. Boyarsky, O. Mikulenko, M. Ovchinnikov and L. Shchutska, Searches for new physics at SND@LHC, e-Print: 2104.09688 [hep-ph].
- [11] T. Sjöstrand *et al.*, [Comput. Phys. Commun.](#) **191**, 159 (2015).
- [12] L. Buonocore *et al.*, [JHEP](#) **05**, 028 (2019).