GEM 검출기와 CMS 국제공동연구

DOI: 10.3938/PhiT.20.053

박 인 규

GEM Detector & the CMS Collaboration

Inkyu PARK

A newly introduced detector technology is reviewed. The gas electron multiplier, the so-called GEM, is a type of gaseous ionization detector that can induce electron avalanche from a micro-hole pattern structure printed on a thin-film capacitor. A GEM was made by a detector development group at CERN for the first of time in 1997. In this article we briefly introduce the principle of GEM detector and show some major applications. Recent on-going R&D efforts in Korea are also presented. Finally we end this article with a GEM R&D and production plan for the CMS detector upgrade in the near future.

서 론

물리실험이 점점 더 복잡해지고 더 정밀해질수록, 관련된 검출기의 사양도 거기에 맞추어 더 복잡해지고 더 정밀해져 가기 마련이다. 그러나 기술적으로 더 정밀해질 수 없는 어떤 순간에 도달하거나 또는 기존의 검출기로는 검출할 수 없는 새로운 현상을 측정해야만 하는 때가 되면, 으레 새로운 검출 기술이 개발되곤 하였다. 1913년의 가이거계수기가 그랬고, 1968년 샤르팍의 멀티와이어 검출기가 그랬다. 지난 20세기 100년의 역사는 에멀전 필름으로부터, 광증배관을 이용한 열량계, 와이어 챔버, 반도체를 이용한 검출기에 이르기까지 새로운 검출기술의 개발과 거기에 따른 새로운 입자 또는 새로운 현상들의 발견, 그리고 그에 따른 응용기술 개발과 산업의 발전이라는 맥락에서 보아도 과연 물리학의 세기였었다고 감히 말할 수 있겠다. 20세기가 문 닫기 직전인 1997년에는 GERN의 실험물리학자인 Fabio Sauli가 새로운 검출기에 대한 아이디어를 제안하면서 이러한 역사의 전통이 금세기에

저자약력

박인규 교수는 University of Paris II 이학박사(물리학)로서 현재 서울시립대학교 물리학과 교수로 재직 중에 있으며, 한국CMS실험사업팀의 대변인으로 일하고 있다. (icpark@uos.ac.kr)

Fig. 1. Principle of Wire chamber.

이어질 것임을 우리에게 시사하고 있다.^[1] 이 글에서는 새로이 떠오르고 있는 검출기 기술인 GEM 검출기에 대해 그 기반 기술과 성능, 개발현황, 그리고 응용성 등을 알아보고, 아울러 우리나라 연구진들에게 있어 GEM 검출기가 향후 어떤 의미로 다가오게 될지도 짚어 보고자 한다.

가스이온화 챔버

입자검출기는 그 사용 매체가 가스이든 액체이든 고체이든 간에 사실 다 같은 원리를 사용하고 있다. 즉 입자가 매체를 지나갈 때 발생하는 다양한 물리현상을 검출하는 것인데, 그 중 가장 일반적인 것이 하전입자가 일으키는 이온화 과정과 거기서 발생하는 전자들을 증폭하여 그 신호를 검출하는 것이다. GEM 검출기의 원리를 이해하기 위해 우선 살펴볼 검출기는 멀티와이어챔버(Multi-Wire Chamber)인데, 보통 그냥 와이어챔버라고도 불리는 검출기이다. 이는 가이거 계수기를 발전시킨 검출기라고 할 수 있는데, 보통 커다란 금속 통 안에 많은 수의 가는 도선이 평행으로 연결되어 있는 구조를 가지고 있다(그림 1 참조). 바깥을 둘러싸고 있는 금속 통은 보통 그라운드에 접지되어 있고, 동시에 이 통 내부에 채워진 가스를 밀봉하는 역할도 종종 겸하게 된다. 와이어챔버에는 보통 하전입자에 의하여 쉽게 이온화될 수 있는 성질이 있는

REFERENCES

- [1] "A GEM of a detector", CERN Courier, Nov. 27, 1998.

Fig. 2. Electric static field induced by two thin conductor lines.

Fig. 3. Particle tracks reconstructed in TPC, Time Projection Chamber.

기체로 채워져 있는데, 아르곤, 메탄 등의 혼합물이 주로 사용된다. 한편 도선에 인가된 전압 때문에 이 원통형 도선 주변에는 등방형 전기장이 형성되는데 (그림 2 참조), 이온화 과정에서 생성된 전자들은 이 전기장에 의하여 가속되어 더 많은 이온화과정을 일으키고, 이렇게 생성된 다량의 전자들은 도선에 모이게 되고, 이로써 도선에 전류가 흐르게 된다. 이렇게 전류가 흐른 도선의 위치를 연결하면 하전입자의 궤적도 알 수 있다. 또한 도선에 흐르는 전류의 크기는 초기 이온화된 전하량에 비례하므로, 하전입자의 에너지에 비례하고, 따라서 와이어챔버를 사용하면 어느 정도 수준의 입자의 에너지도 측정이 가능하게 된다.

에너지 분해능을 높이기 위하여 와이어챔버에는 종종 자기장을 인가하기도 한다. 그렇게 함으로써 하전입자는 검출기 안에서 나선형운동을 하게 되고, 이로부터 하전입자의 전하와 운동량을 측정할 수 있게 된다. 더 나아가 도선에 흐르는 전류신호의 시간을 정밀히 잘 측정하고, 이온화로부터 생성된 전자의 유동시간(drift time)까지 잘 고려하면 하전입자의 궤적을 더욱 정밀하게 측정할 수 있게 되는데 이렇게 향상된 성능을 가진 와이어챔버를 드리프트 챔버¹⁾라고 부른다. 드리프트 챔버를 더욱 발전시켜 챔버공간에 전기장도 같이 인가함으로써 이온화된 전자의 유동방향을 정할 수 있고, 유동방향에 수직한 방향으로 와이어를 서로 직교하게 배열하여 2차

Fig. 4. Principle of semi-conductor detector.

원 좌표를 얻을 수 있다. 여기에 유동속도까지 고려하여 입자의 3차원 궤적도 측정할 수 있게 되는데 이렇게 설계된 검출기가 바로 TPC(Time Projection Chamber)이다(그림 3 참조).

TPC는 과거뿐 아니라 현재까지도 여러 핵 및 입자물리 실험에 주요 입자검출기로 각광받고 있다. LEP 실험에서의 ALEPH나 DELPHI가 성공적으로 TPC를 통해 입자들의 궤적을 3차원으로 재구성하였고, 현재도 RHIC 실험의 하나인 STAR의 트랙킹 디바이스가 TPC이며, LHC 실험의 ALICE 검출기도 TPC를 주요 트랙검출기로 사용하고 있다.

반도체 검출기

다이오드의 작동원리를 이해하는 사람이면 누구나 반도체 검출기를 이해할 수 있다. 반도체 다이오드에 역방향 바이어스 전압을 인가하면 평상시에는 전류가 흐르지 않으나, 반도체 내에 입자가 지나가게 되면 반도체 내에 전자와 정공이 생성되고, 이들이 캐리어가 되어 전류가 흐르게 된다(그림 4 참조). 전류가 흐르는 반도체의 위치로부터 입자가 지나간 위치를 알 수 있고, 또 그 전류의 크기로부터 대략의 입자의 에너지를 알 수 있으므로, 반도체 다이오드의 크기를 줄이고 세밀히 배열한다면 매우 좋은 위치분해능을 갖는 입자검출기를 만들 수 있게 된다. 원리적으로 반도체검출기의 위치분해능은 집적 회로 공정의 분해능과 같으므로, 와이어챔버로 얻을 수 있는 분해능과는 비교가 되지 않을 정도로 좋다. 그렇다고 반도체검출기가 모든 면에서 좋은 것은 아니다. 반도체 검출기는 그 제작단가가 비싸 큰 공간을 채우는 데는 너무 큰 비용을 요구하고, 적절한 냉각장치를 필요로 하고, 또한 방사선을

1) 드리프트를 유동으로 번역하여 유동챔버로 할 수 있겠으나, 필자는 고유명사형태로 받아들여 번역 없이 그대로 부르기로 한다.

Fig. 5. CERN RD39 silicon strip detector.

쪼임에 따라 반도체가 손상되어 검출기 성능이 떨어지는 단점이 있다. 대부분의 경우 입자충돌기에서 생성된 충돌사건은 빔방향의 수직인 면에서 벌어지는 물리량이 중요하다. 이는 두 입자의 충돌 시 빔 방향에 수직인 횡단면에서의 초기 운동량이 0이었으므로, 충돌사건이 벌어지고 난 이후에 검출기에 찍힌 모든 입자들의 횡단면 성분의 운동량의 합 또한 0이 되어야 하므로, 이를 바탕으로 다양한 물리적 사실들을 끌어낼 수 있기 때문이다. 이렇게 횡단면 성분만을 필요로 할 시에는 굳이 엄청난 제작비가 필요한 TFT-LCD 형태 같은 2D 매트릭스 구조의 실리콘 센서를 만들지 않고, 와이어 검출기 때와 마찬가지로 스트립 형태의 센서를 주로 만들어 사용하게 된다. 물론 3차원 궤적이 필요할 때는 스트립으로 설계된 센서를 직교로 2장을 놓게 되면 2D 구조와 같은 효과를 볼 수 있다.

GEM 검출기

GEM은 Gas Electron Multiplier의 약자로 우리말로 굳이 번역한다면 “기체전자증배기”라 할 수 있겠는데, 이는 광자의 갯수를 증폭시키는 광증배기(Photo-multiplier) 또는 광증배관(Photo-Multiplier Tube)에 대응하는 이름이라고 여기면 되겠다. GEM 검출기는 입자검출의 매체로 기체를 사용한다는 점에서 기체검출기의 일종으로 볼 수 있다. GEM 검출기의 구조는 와이어 검출기 또는 TPC와 비슷한데, 와이어 대신에 GEM 호일이 들어간다는 점과 신호를 검출하는 readout 부분이 있다는 점에서만 차이가 난다(그림 6 참조). 와이어 검출기가 가는 원통형 도선에 인가된 고전압을 통해 강한 전기장을 유도하여 전자의 아발란치(전자사태)를 유도하는 것과 유사하게, GEM 검출기에서는 그림 7에서 보는 바와 같이 고

Fig. 6. Schematic view of GEM detector.

Fig. 7. Electron avalanche induced by the electric field from a GEM foil.

전압이 인가된 얇은 평판 사이에 만들어진 가는 구멍을 통해 강한 비균질 전기장을 만들어 내며, 이 구멍 안에서 전자사태가 발생되어 많은 양의 전자가 방출되게 하는 구조를 갖는다.

일반적으로 GEM 검출기에 사용되는 평판은 약 50–70 마이크로미터 정도의 두께의 캡톤(kapton) 필름에 5–10 마이크로미터 정도의 구리막이 양면에 쌓여있는 구조로 되어 있다. 여기에 일반적인 반도체 공정에 사용되는 광식각과 에칭기술을 활용하여 50–70 마이크로미터 정도의 구멍을 뚫게 된다. 이러한 마이크로공정을 통해 미세한 구멍을 매우 주기적으로 만들 수 있고, 만들어진 GEM 평판은 거의 반투명으로 보이게 된다. 수많은 미세 구멍만 없다면 각종 전자기기 내에 부품과 부품 사이를 연결하는 FPCB(Flexible Printed Circuit Board) 즉 연성회로기판과 사실상 같은 구조이다. 그림 8은 이렇게 만들어진 GEM 호일의 구조를 보여주고 있다.

이렇게 만들어진 평판구조 양면에 보통 수백 볼트의 고전압을 인가하여 구멍내부에 강한 전기장을 만들게 되는데, 이

Fig. 8. Structure of a typical GEM foil.

Fig. 9. Schematic view of a 3-layer GEM and the High Voltage unit for drift field.

온화를 일으키는 기체만 잘 선택한다면, 보통 1개의 전자가 들어가 수백 개에서 수천 개 사이의 전자를 얻을 수 있게 된다. 더 나아가 이러한 GEM 호일을 2장 또는 3장 연속적으로 놓는다면 전자를 수만~수백만 배 증폭시킬 수 있어, 다층구조의 GEM 검출기를 사용하여 검출기의 감도를 현격하게 높일 수 있는 장점도 있다. 와이어챔버에서는 전자의 아발란치를 유도하기 위해 인가한 전압이 동시에 전자들을 도선 주위로 끌려오게 하는 drift장도 함께 제공하는 반면, GEM 검출기에서는 전자의 drift를 일으키게 하는 외부전기장이 필요하다. 즉, 가스의 이온화에서 발생된 전자를 GEM 호일 근처까지 끌고 오는 전기장과 GEM에 의하여 증폭된 전자가 GEM 호일을 떠나 다시 유동하여 readout까지 도달시키기 위한 전기장이 필요하다는 말이다. 이는 그림 9에서 보는 바와 같이 전체 GEM 검출기에 매우 큰 고전압을 인가하고 적당한 저항을 각 부분에 연결함으로써 쉽게 구현할 수 있다.

Fig. 10. Cut-away view of two GEM layers made by CERN and by a Korean company.

이상에서 알아본 바와 같이 GEM 검출기의 제작기술은 많은 부분 반도체 제조공정, 연성기판 제조공정들과 기술적으로 맥락을 같이 하고 있어, 우리나라의 제조기술의 수준을 고려하면 사실상 아주 쉽게 개발할 수 있는 검출기라 말할 수 있겠다. 실제로 CMS국제공동연구단의 경우 전방지역에 추가할 검출기로 GEM을 심각하게 고려하고 있고, 이에 CMS연구단 내에 GEM 검출기추진팀을 따로 운영하고 있다. 또 CERN에서는 RD51이라는 국제공동연구팀을 구성하여 GEM 검출기에 대한 전반적인 R&D 프로젝트를 수행하고 있다. 최근 이 팀들이 한국의 한 중소기업 업체를 통해 8 cm × 8 cm 크기의 프로토타입 GEM 호일을 주문 생산한 바가 있고, 이를 RD51에서 테스트하여 매우 우수한 성능을 보여준다는 결과를 관련학회에서 발표한 바 있다(그림 10 참조). 이는 향후 GEM 검출기 생산에 한국이 주도적인 역할을 할 수 있다는 가능성을 보여주는 기쁜 뉴스라 할 수 있겠다.^[2]

GEM 검출기의 응용

GEM 검출기의 활용은 입자 및 핵물리학에만 국한되지 않

REFERENCES

- [2] "GEMs for CMS High-eta", Archana SHARMA, MPGD2011 at Kobe, Japan, Aug.29, 2011.

Fig. 11. Images from the neutron irradiation to 5 different metal plates. One of them was originally bent and re-flatten. This was detected by a boron coated GEM detector.

는다. GEM 검출기의 특성을 잘 활용하면 의료, 국방, 보안, 산업용에 이르기까지 다양한 검출기 응용분야를 찾을 수 있다. 예를 들자면 GEM 검출기를 대형으로 제작하여 우주선뮤온을 검출하는 데 사용할 수 있는데, 이를 조금만 더 응용하면 보안용 투시기를 제작할 수 있는 근본 기술이 되기도 한다. 하늘에서 매우 많은 뮤온들이 지상으로 떨어지고 있다는 사실은 과학에 조금만 관심이 있는 사람들은 다 알고 있는 상식이다. 플로리다 공대의 한 팀은 이들 뮤온을 활용하여 수출입에 사용되는 거대한 컨테이너 박스들을 일일이 열어보지 않고도, 그 안에 핵물질이 들어 있는지를 알아 낼 수 있는 기술을 개발하고 있다. 예를 들어 컨테이너 박스 안에 농축 우라늄 등 무거운 핵물질이 숨겨져 있을 경우 우주선뮤온들이 이들 핵 주변을 통과할 때 큰 각도로 휘게 되어 뮤온들은 직선궤적을 만들지 않고 꺾어진 궤적을 만들게 된다. 이 휘어지는 각도가 원자번호(Z)에 비례한다는 간단한 사실에 기초하여, 컨테이너 박스의 상단부와 하단부에 커다란 GEM 검출기를 여러 장 설치하여, 우주선뮤온 사건에 오랜 시간 노출시킨 후, 그 궤적들의 산란각 분포를 바탕으로 컨테이너 내부에 무거운 핵물질이 존재하는지의 여부를 판단할 수 있게 된다.^[3]

GEM 검출기에 약간에 변화를 주면 중성자 검출기로도 활용이 가능하다. 일본 KEK연구소를 중심으로 한 한 연구팀은 GEM 호일의 구리박막 위에 수 마이크론 정도의 두께로 붕소(boron, ^{10}B)를 도포하여, 중성자가 붕소의 핵과 반응($^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha + \gamma(2.8 \text{ MeV})$ 또는 $^7\text{Li}^* + \alpha + \gamma(2.3 \text{ MeV})$)하여 나오는 알파입자와 감마선이 만들어내는 이온화 또는 콤프턴 산란 전자들을 검출할 수 있는 간단한 중성자 검출기를 만들 수 있음을 보여주었다. 이렇게 만들어진 중성자 검출기는 아주 새로운 영역에서 기존의 검출기가 할 수 없었던 역할을 할 수 있음을 보여주었는데, 그 일례로 구부러졌다 다시 편금속시편과 원래부터 평편했던 금속 시편은 육안이나 X-ray로는 구별이 되지 않으나, 중성자 검출기를 사용하면, 금속내부의 미세한 구조변화도 검출해 낼 수 있음을 일본의 한 대

학연구팀이 보여주기도 하였다(그림 11 참조).^[4]

또 다른 GEM 검출기의 응용으로 GEM 검출기를 투명한 유리 막으로 패키징하고 여기에 CCD 카메라를 직접 연결함으로써, X선으로부터 산란된 전자가 GEM 호일로부터 증폭되고 이때 발생된 빛을 직접 CCD 카메라로 획득하는 디지털 X레이 기술을 들 수 있다. 디지털 X레이는 이미 의료시장에서 기존의 필름형 X레이 장비를 대체하기 시작하였고, 향후 GEM을 활용한 대면적 디지털 X레이 검출기가 상용화된다면, 아마도 필름을 사용한 X선 영상장비는 자취를 감추지 않을까 예상이 된다.^[5]

CMS국제공동연구에서의 GEM 검출기

위에서 언급한 CERN의 RD51과 CMS국제공동연구단이 추진하고 있는 GEM 검출기에 대하여 좀 더 알아보자. 현재 LHC 가속기는 원래 디자인했던 충돌에너지와 빔의 회도를 제대로 구현하고 있지 못하고 있는 실정이다. 원래는 양성자 빔을 각각 서로 다른 방향으로 7 TeV의 에너지로 가속하여 충돌시킴으로써 14 TeV의 에너지를 얻으려고 하였고, 빔의 회도도 $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ 로 디자인되었었다. 그러나 2008년 LHC의 첫 가동과 동시에 문제점이 발견되었고, 이 때문에 현재는 계획했던 충돌에너지의 반인 7 TeV의 충돌에너지와 약 10배 가량 작은 회도($\sim 10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$)로 가속기가 가동되고 있다. 이를 원래 목표했던 가속기 스펙으로 다시 끌어올리기 위해 LHC는 두 번의 긴 셧다운 기간을 계획하고 있다. 그 첫 번째가 2013년경에 시작되어 약 1년 반의 기간이 소요될 것으로 예상되는 LS1(Long Shutdown 1) 기간이고, 두 번째가 2017년 정도에 시작되는 LS2(Long Shutdown 2) 기간이다. LS1 기간에는 우선 충돌에너지를 14 TeV까지 끌어 올리고, LS2 기간에는 빔의 회도를 $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ 로 끌어올려 2018년부터는 고회도 실험을 하는 것이 그 목표가 되겠다.

고회도 환경하에서의 뮤온 검출은 CMS 실험에 있어 가장 중요한 요소 중에 하나이다. 특히 고회도 충돌에서는 전방지역으로 수많은 입자들이 생성되어, 저항판 검출기(RPC)로 구성된 현재의 뮤온 시스템을 더 정밀도가 높은 검출기로 업그레이드

REFERENCES

- [3] "A First Application for the Scalable Readout System: Muon Tomography with GEM Detectors", Marcus Hohlmann, RD51 Collaboration Meeting WG5 - May 25, 2010.
- [4] "Development of Neutron Detector with GEM", S. Uno *et al.*, UCANS-I, Beijing China, Aug. 17, 2010.
- [5] "Development of a gaseous detector based on GEM technology", F. Murtas, Frascati, Nov. 28, 2002.

Fig. 12. Cut-away view of the CMS detector. ME1/1, ME2/1, ME3/2, ME4/1 are the empty area where the new detector will be installed in 2017.

레이드할 필요가 생긴다. 특히 현재의 CMS 검출기에는 유사 신속도(pseudo-rapidity: η)가 1.6 이상인 지역에 검출기가 설치되어 있지 않기 때문에(그림 12 참조), 이 영역에서의 뮤온시스템의 설치에 LS2 기간 중에 수행될 CMS 업그레이드 계획 중에 가장 중요한 것으로 여겨지고 있다. 이 전방지역에 설치될 뮤온시스템의 기반 기술로 현재 멀티랩을 갖는 저항판 검출기와 GEM 검출기가 둘 다 고려되고 있다. 어느 검출기 기술이 이 전방지역 뮤온시스템으로 더 적합한지는 더 연구를 해보아야겠지만, 이는 성능뿐 아니라 제작에 들어가는 비용, 인력, 방사선 내구성 등 다양한 요소들이 고려되어야 하는 일로 쉽게 판가름나지 않을 것이라 여겨진다.^[6,7]

한국CMS실험사업팀은 지난 10년간 RPC 검출기 제작에 참여하여 전방지역 뮤온시스템 구축에 이탈리아와 더불어 가장 큰 공헌을 해오고 있었으며, 향후 LS2 기간 중에는 이 미 설치된 전방지역에 뮤온시스템을 구축하는 역할을 주도적으로 추진할 계획을 가지고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 LS2 기간 중에 있을 CMS 업그레이드 계획 중에 가장 주목을 받을 내용으로, 이를 통해 한국CMS실험사업팀의 역량이 널리 잘 알려질 것이라 예상된다. 이를 위해 한국CMS실험사업팀은 2012년부터 2016년까지 약 5년간 관련 검출기 기술을 개발하고 생산할 계획을 수립해 놓고 있고, 여기에 발맞춰 인력구성과 개발팀 구성을 추진하고 있다.

결 언

이상에서 알아본 바와 같이 GEM 검출기 기술은 20세기 마지막 순간에 개발되어 이제 본격적으로 기술개발이 이루어지고 있는 신기술이다. 많은 부분 GEM 센서의 제작 기술은 반도체 정밀가공기술과 맥락을 같이 하여 반도체 강국인 우리나라가 잘 만들 수 있는 검출기라 할 수 있다. 지난 세기 일본의 경우 전자공학이 비약적으로 발전하면서 축적된 정밀한 진공관 제조기술이 후에 광증배관을 가장 잘 만드는 하마마추(Hamamatsu)라는 세계적인 광학센서 전문기업을 만들어 내는 역사를 보여준 바 있다. 이를 바탕으로 미루어 짐작컨대 우리나라의 경우 현재 반도체 및 정밀가공분야에서 세계 제일의 기술력을 보여주고 있어, 검출기 기술 분야에서도 곧 두각을 나타낼 것이라 생각한다.

지난 세기말 CERN에서 WWW가 만들어지면서 정보화혁명이 촉발되었고, 이에 21세기의 주요 화두로 통신과 네트워크를 뛰어 넘어 유비쿼터스 정보화 시대가 떠오르고 있다. 유비쿼터스 정보화 사회란 우리생활 주변 모든 곳에서 다양한 정보가 얻어져 전달되는 것을 의미하고, 이는 곧 다양한 센서기술, 즉 다양한 검출기 기술이 우리 생활 곳곳에 쓰일 것임을 시사한다. 또 일상을 떠나 우리나라에도 앞으로 몇 년 안에 중이온 가속기를 중심으로 하는 가속기 복합 시설이 생길 것이고 이 시설을 활용할 입자검출기도 같이 개발될 예정이므로, 이런 시점에서 검출기 관련 기술을 축적하는 것은 국가의 미래에 대한 확실한 투자가 될 것이다. 따라서 이 시점에서 한국CMS실험사업팀이 GEM 검출기 R&D에 뛰어들어 실제 국제공동연구에 사용될 검출기를 제작하고 2017년경에 예상되는 CMS 업그레이드에 주도적인 역할을 하고, 검출기에 관련된 핵심전문인력을 양성하는 것은 국가의 장래를 환하게 비춰줄 매우 중요한 과업이라 할 수 있겠다.

REFERENCES

- [6] "Characterization of a Full-Size Triple-GEM Based Prototype for the CMS Muon Detection System", Andrey Marinov, ANIMMA Conference, GENT, Jun. 8, 2011
- [7] "Tripple-GEM simulation for a potential CMS Upgrade", Tania Moulik, Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011), 9-14 Jun 2011, Chicago, USA