

# ATLAS დეტექტორის მუონური სპექტრომეტრი

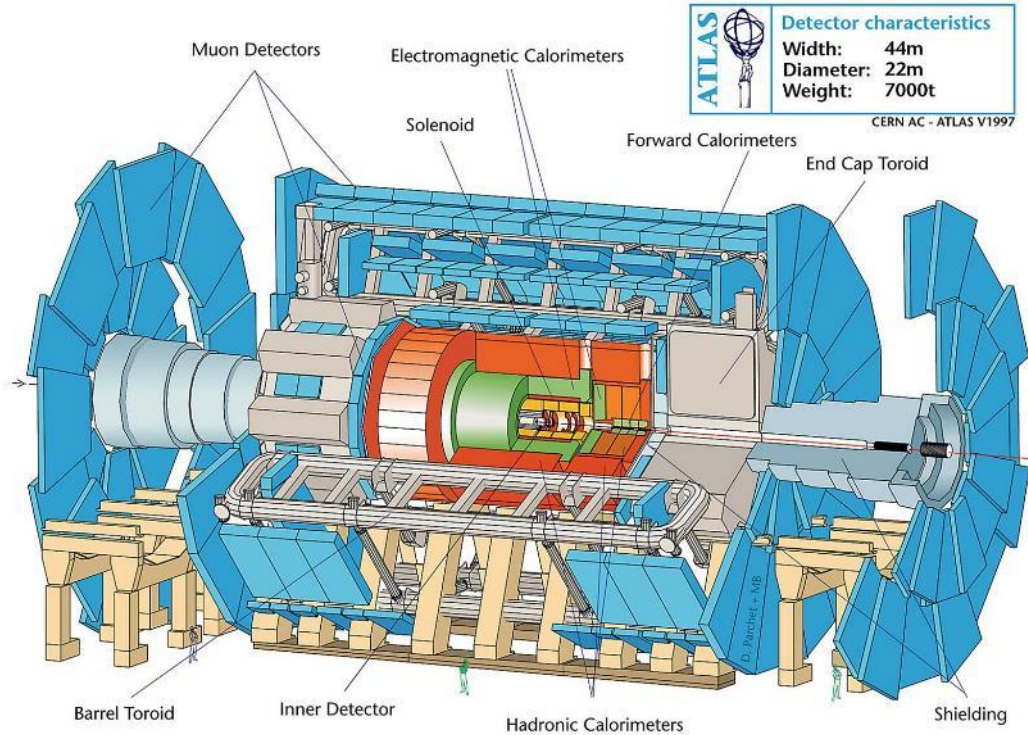
ალექსი ლონლაძე

ე.ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტი, თბილისი  
ბირთვული კვლევების გაერთიანებული ინსტიტუტი, დუბნა

ირმა ლონლაძე

ბირთვული კვლევების გაერთიანებული ინსტიტუტი, დუბნა

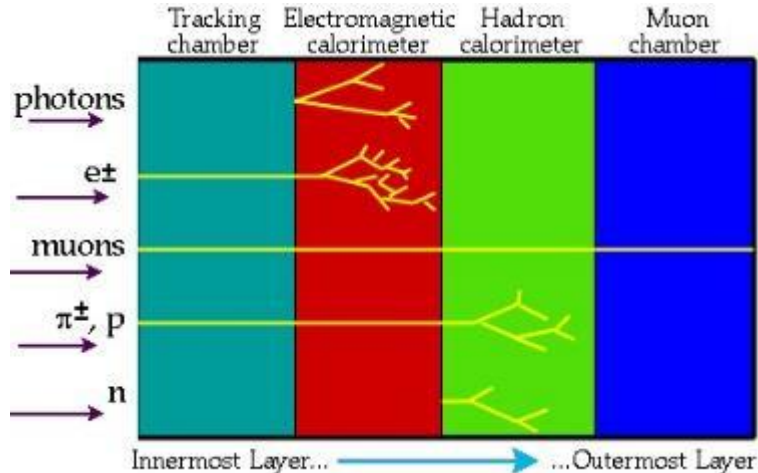
(ი. მინაშვილი უმც., ლ. ლონლაძე)



მრავალდანიშნულებიანი ექსპერიმენტული დანადგარი ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკის ფართო სპექტრის შესასწავლად - სტანდარტული მოდელის ნაწილაკების ზუსტი გაზომვებიდან დამატებით განზომილებებსა და ბნელი მატერიის ნაწილაკებამდე.

შესდგება ცენტრალური კასრისა (barrel) და ორი სარქველისაგან (end-cup).

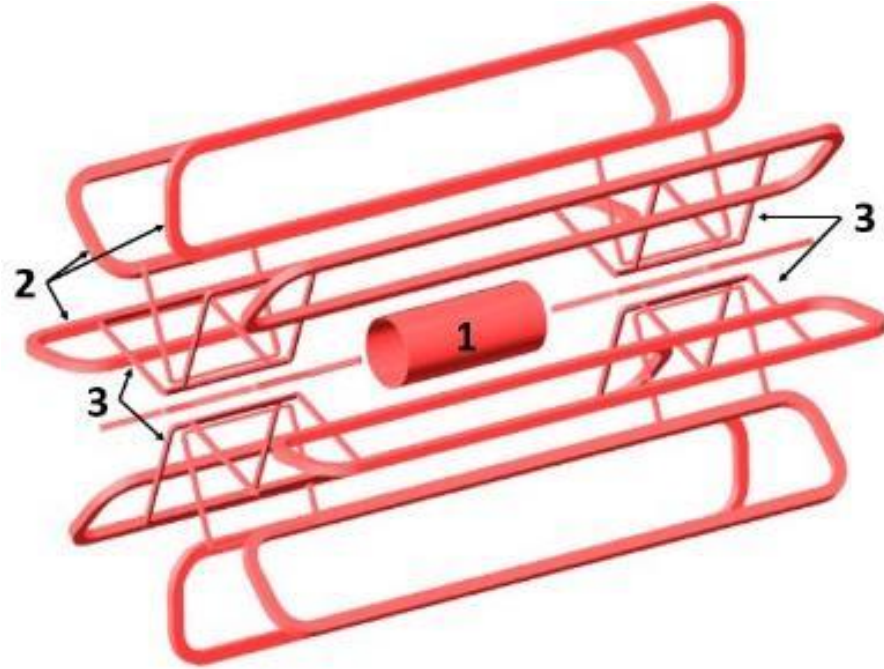
მოიცავს სამ ქვედეტექტორულ სისტემას: შიდა დეტექტორს, კალორიმეტრებს და მიონურ სპექტრომეტრს



შიდა დეტექტორი (ტრეკერი) მგრძობიარეა ყველა დამუხტული ნაწილაკების მიმართ. ელექტრონები და ფოტონები ძირითადად შთაინთქმება ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრით, ხოლო მძიმე ნაწილაკები, როგორცაა ადრონები და ჭავლები - ადრონული კალორიმეტრით. რამდენიმე გეგ-ზე მეტი ენერჯის მქონე მუონებს შეუძლიათ გაიარონ ყველა ქვედეტექტორი და მიაღწიონ მიონურ სპექტრომეტრს.

*ნაწილაკების იმპულსის გასაზომად, შიდა ტრეკერი და მიონური სპექტრომეტრი ჩადგმულია მაგნიტურ ველში!*

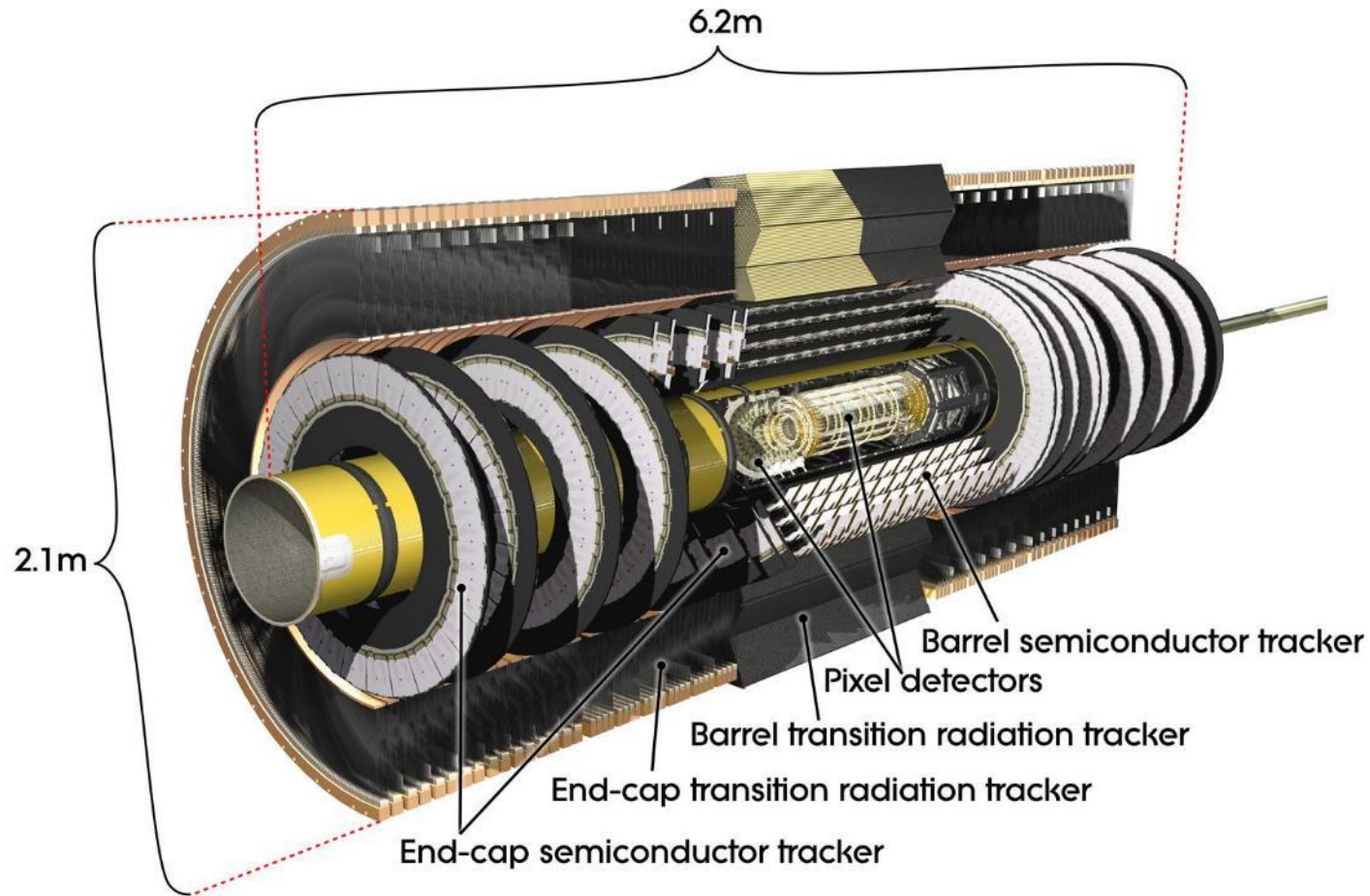
# ATLAS: მაგნიტების სისტემა



## ზეგამტარული მაგნიტების 4 სექცია:

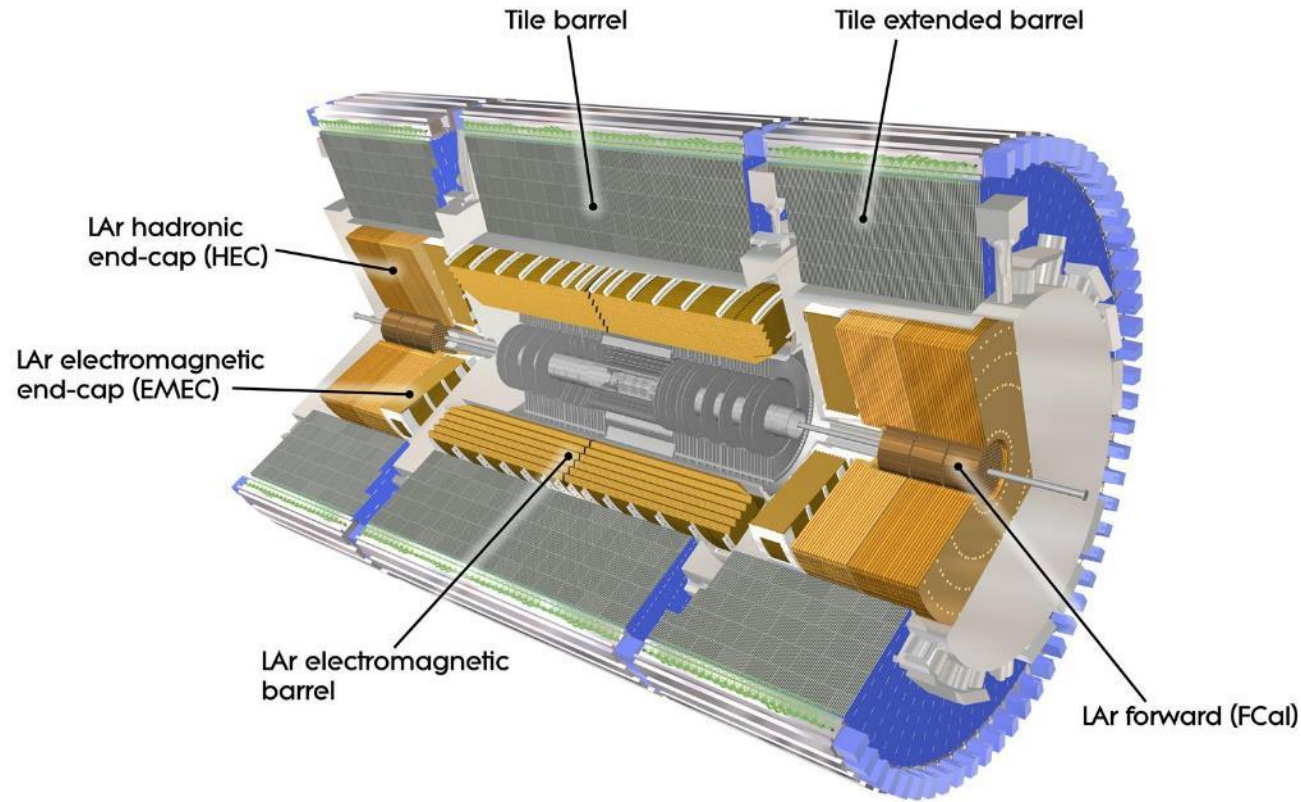
- 1) ცენტრალური სოლენოიდი ტრეკერისთვის (სიგრძე 5,35 მ, შიდა დიამეტრი 2,53 მ) -  $I=7,7$  კა,  $B=2$  ტ
- 2) ცენტრალური ტოროიდი -  $I=20,5$  კა,  $B=4$  ტ.  
მთლიანი ტოროიდული ცილინდრის დიამეტრი 20 მ, მასა ~830 ტონა.
- 3) 2 სარქველის ტოროიდი -  $I=20,5$  კა,  $B=4$  ტ.  
თითოეულის დიამეტრი 11 მ, სიგანე 5 მ, მასა ~240 ტონა

# ATLAS: შიდა დეტექტორი (Inner Detector, ID)



შედგება სამი დამოუკიდებელი, მაგრამ ერთმანეთის შემავსებელი დეტექტორებისგან:

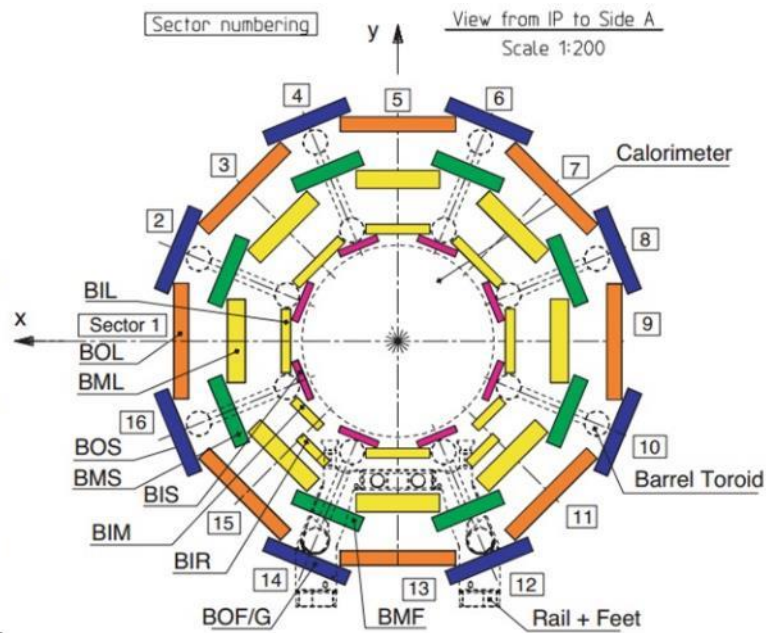
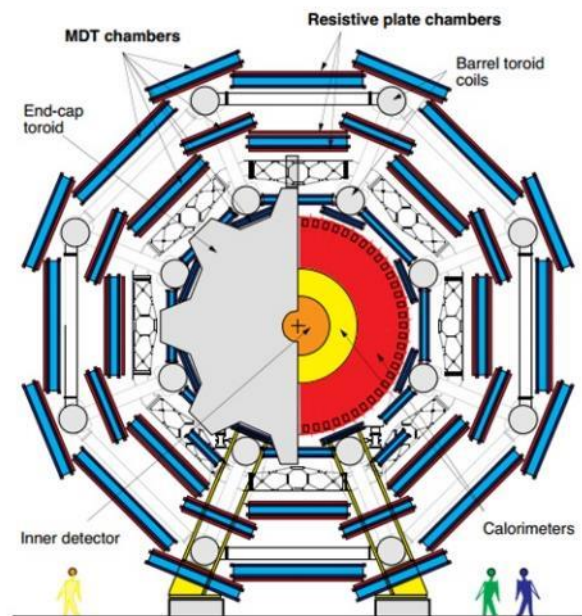
- 1) პიქსელ დეტექტორი (Pixel detector, PIX) - ყველაზე შიდა ნაწილი, 1744 სილიკონის პიქსელის მოდული განლაგებული 3 ცილინდრული და 2 სარქველის ფენაში. პიქსელის ზომა 50x400 მკმ. სულ ~ 80.4 მ არხი. სივრცული გარჩევადობა 10/115 მკმ
- 2) სილიკონის მიკროზოლოვანი დეტექტორი (Semiconductor detector, SCT) - პიქსელ დეტექტორის გარშემო 4 ცილინდრული და 9 სარქველის ფენა, „ზურგი-ზურგთან“ კონფიგურაცია, სივრცული გარჩევადობა 17/580 მკმ
- 3) გარდამავალი გამოსხივების ტრეკერი (Transition Radiation Tracker, TRT) - ყველაზე გარე ფენა. ~ 300 000 თხელკედლიანი დრეიფული მილებისაგან (straw - ჩალა) დიამეტრით 4 მმ, 30 წერტილი ტრეკზე 130 მკმ სივრცული გარჩევადობით.



შიდა ელექტრომაგნიტური და გარე ადრონული კალორიმეტრები

- 1) ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი - აქტიური მასალა თხევადი არგონი. 3 ნაწილი - ცენტრალური (Lar barrel) და ორი სარქველი (EMEC). ძირითადად ზომავს ელექტრონებისა და ფოტონების ენერგიას
- 2) ადრონული კალორიმეტრი (Tile-კალორიმეტრი) - ცენტრალურ ნაწილში სცინტილატორები როგორც აქტიური მასალა და ფოლადის შთამნთქმელები; ბოლოებში (FCal) არგონი როგორც აქტიური მასალა და სპილენძისა და ვოლფრამის შთამნთქმელებით

# ATLAS: მიონური სპექტრომეტრი



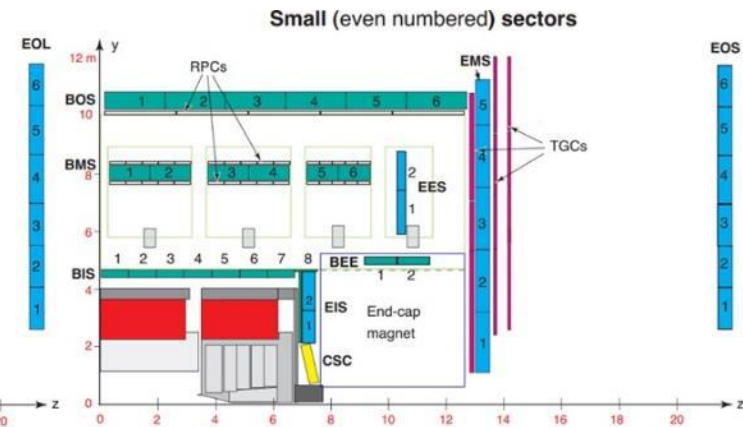
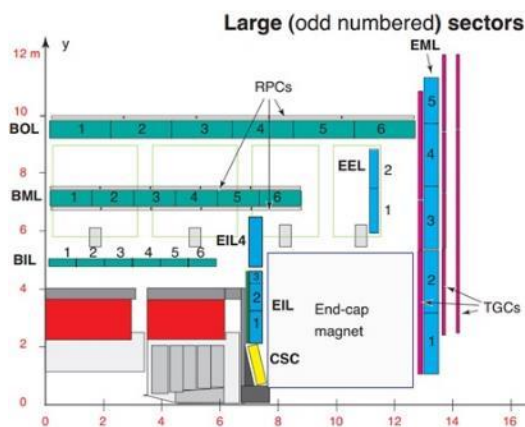
ATLAS-ის ყველაზე დიდი და გარეთა ნაწილი! შედგება ცენტრალური (barrel) ნაწილისა და ორი სარქველისაგან (end-cup) დაყოფილი 16 სექტორად

- ცენტრალურ ნაწილში კამერები განლაგებულია სამ ცილინდრულ ფენად სხივის ღერძის ირგვლივ 5, 7,5 და 10 მ მანძილზე, რომლებსაც ეწოდება BI, BM და BO.

- თითოეული სარქველი - 4 დისკი EI, EE, EM, EO 7,4, 10,8, 14 და 21,5 მ შესაბამისი დაშორებით დაჯახების წერტილიდან (IP)

- დამატებითი დამხმარე კამერები BEE, BIR, BIM, BMF, BMG, BOF, BOG, BOE, BME

- ბარელის კამერები მართკუთხედი ფორმის, ენდკაპის - ტრაპეციული



# ATLAS: მიონური სპექტრომეტრი

დეტექტორი	დანიშნულება	გარჩევადობა		
		z/R	$\phi$	დრო
MDT	ტრეკინგი	80/35 მკმ	-	-
CSC	ტრეკინგი	60 მკმ	5 მმ	7 ნწ
RPC	ტრიგერი	10 მმ	10 მმ	1,5 ნწ
TGC	ტრიგერი	2-6 მმ	3-7 მმ	4 ნწ

დეტექტორი	რაოდენობა			ფართობი, მ <sup>2</sup>	არხების რაოდენობა
	ბარელი	ენდკაპი	სულ		
MDT	656	494	1150	5500	354500
CSC		32	32	27	31000
RPC	1116 სექც.		1116	4000	359000
TGC		3588	3588	2900	318000

**ყოველი მათგანი წარმოადგენს გაზურ დეტექტორს!!!**

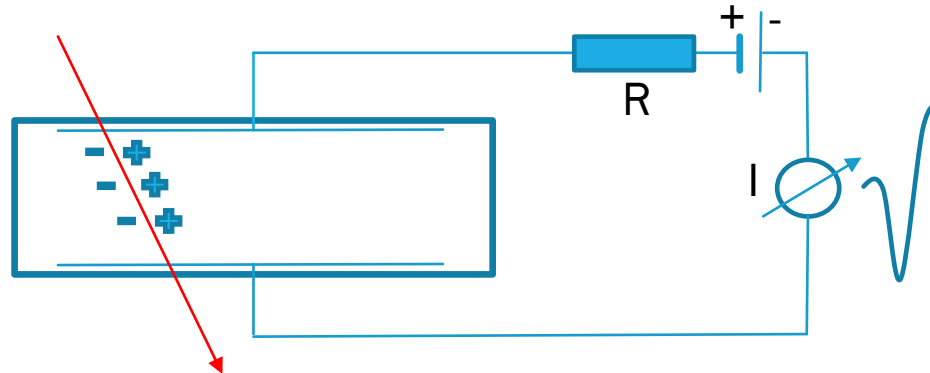
### ელემენტარული ნაწილაკების რეგისტრაციის საერთო/ზოგადი პრინციპი:

დეტექტორების ნეიტრალურ გარემოში (გაზური, თხევადი, მყარი - ამორფული ან კრისტალური) მოძრავი დამუხტული ნაწილაკი იწვევს გარემოს იონიზაციას, მისი ატომების აღზუნებას და პოლარიზაციას.

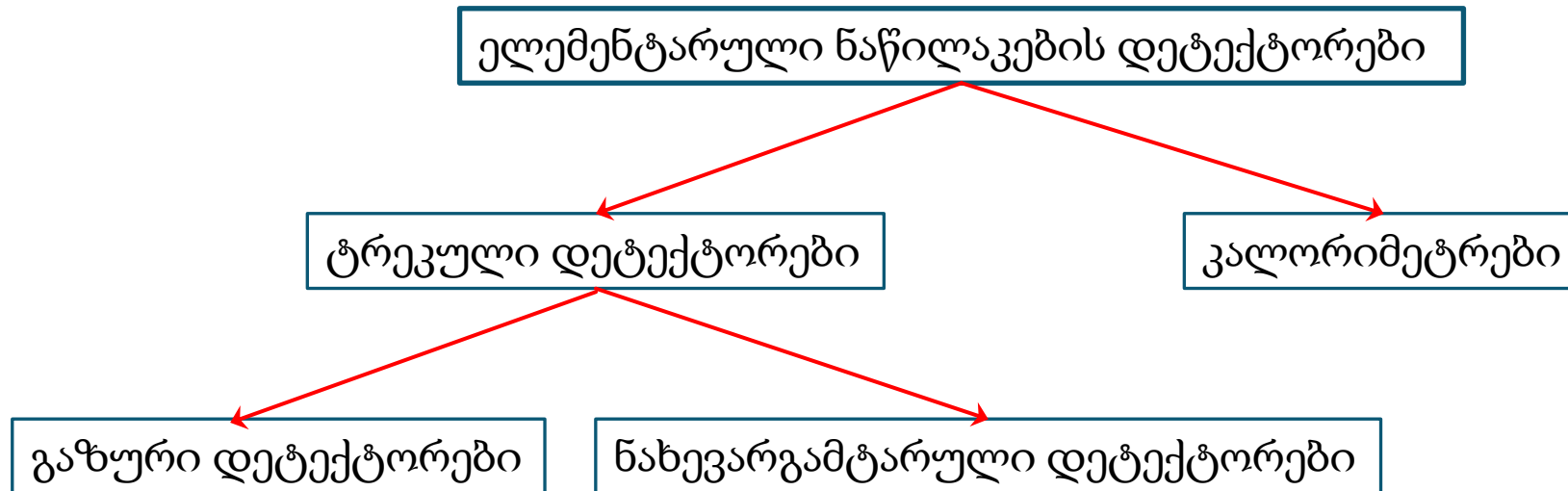
ამრიგად, ნაწილაკის მოძრაობის გზაზე ჩნდება თავისუფალი მუხტები (ელექტრონები და იონები), აღზუნებული და პოლარიზებული ატომები.

ნეიტრალური ნაწილაკები უშუალოდ არ იწვევენ იონიზაციას → დაფიქსირება შესაძლებელია გარემოს ატომების ბირთვებთან ურთიერთქმედებით დაბადებული მეორადი დამუხტული ნაწილაკების ხარჯზე.

იმ შემთხვევაში, თუ დეტექტორს მოვათავსებთ ელექტრულ ველში, მაშინ აღიძვრება დენი რომელიც ფიქსირდება მოკლე ელექტრული იმპულსის სახით.







გაზური დეტექტორები

ნახევარგამტარული დეტექტორები

დეტექტორის გარემო	$\rho$ გ/სმ <sup>3</sup>	$\Delta E /$ წყვილი	# წყვილი/მმ
გაზი (Ar)	$10^{-3}$	30 ევ	3(9)
<del>თხევადი გაზი (LAr)</del>	<del>1,4</del>	<del>24 ევ</del>	<del><math>10^3</math></del>
ნ/გ (Si)	2.3	3.6 ევ	$10^5$

კალორიმეტრია

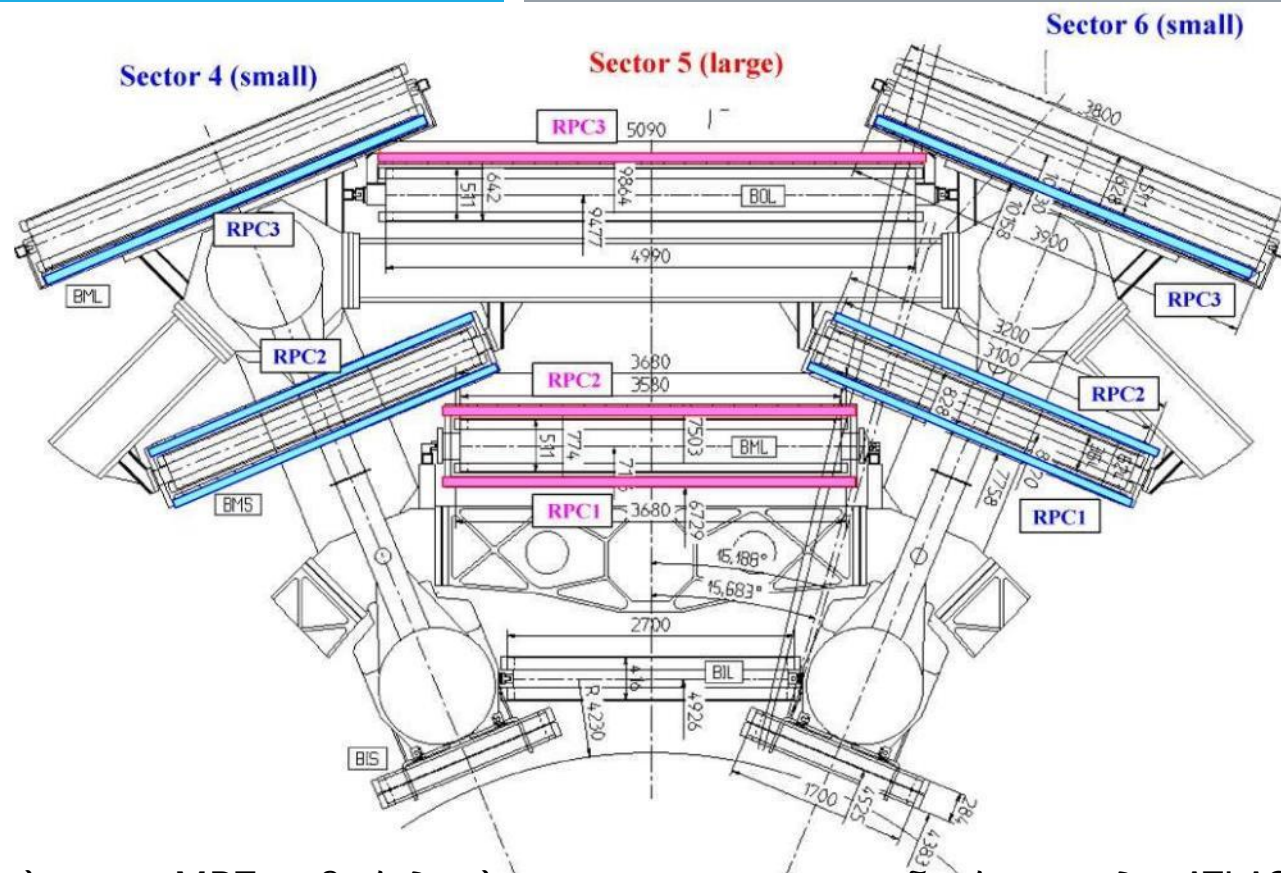
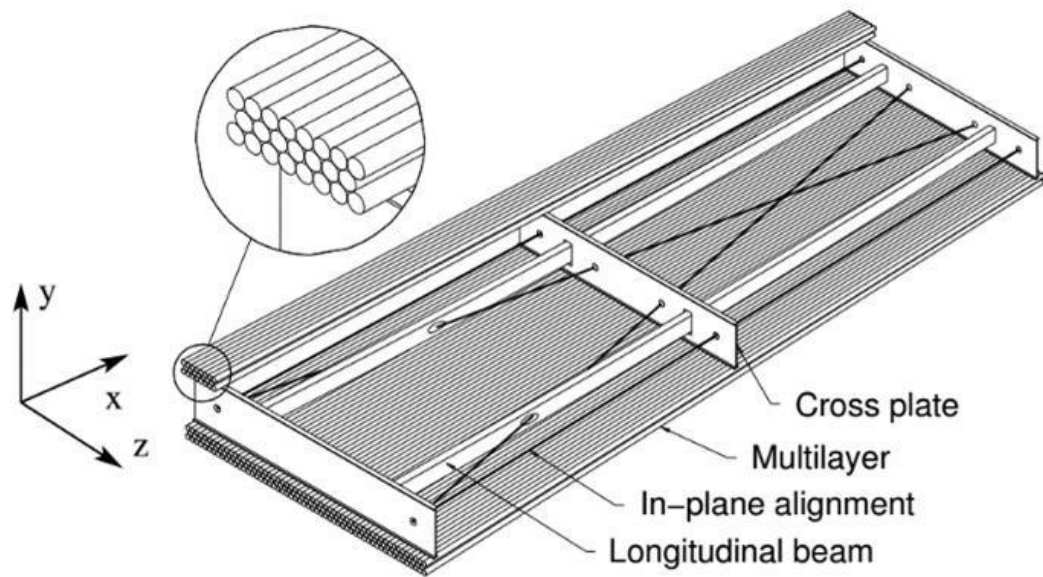
პრინციპში, ნახევარგამტარული დეტექტორები ყველაზე მიმზიდველია:  
 დიდი მგრძობიარობა, კომპაქტურობა, სტაბილურობა, უგრძობი მაგნიტური  
 ველებისადმი . მოიხმარენ დაბალ სიმძლავრეს, აქვთ დაბალი ხმაურის დონე.  
 პრაქტიკული შეზღუდვები: მათი ზომა, მასალის ჰომოგენურობა, მაღალი ღირებულება

# ATLAS: მიონური სპექტრომეტრი

დეტექტორი	დანიშნულება	გარჩევადობა		
		z/R	$\phi$	დრო
MDT	ტრეკინგი	80/35 მკმ	-	-
CSC	ტრეკინგი	60 მკმ	5 მმ	7 ნწ
RPC	ტრიგერი	10 მმ	10 მმ	1,5 ნწ
TGC	ტრიგერი	2-6 მმ	3-7 მმ	4 ნწ

დეტექტორი	რაოდენობა			ფართობი, მ <sup>2</sup>	არხების რაოდენობა
	ბარელი	ენდკაპი	სულ		
MDT	656	494	1150	5500	354500
CSC		32	32	27	31000
RPC	1116 სექც.		1116	4000	359000
TGC		3588	3588	2900	318000

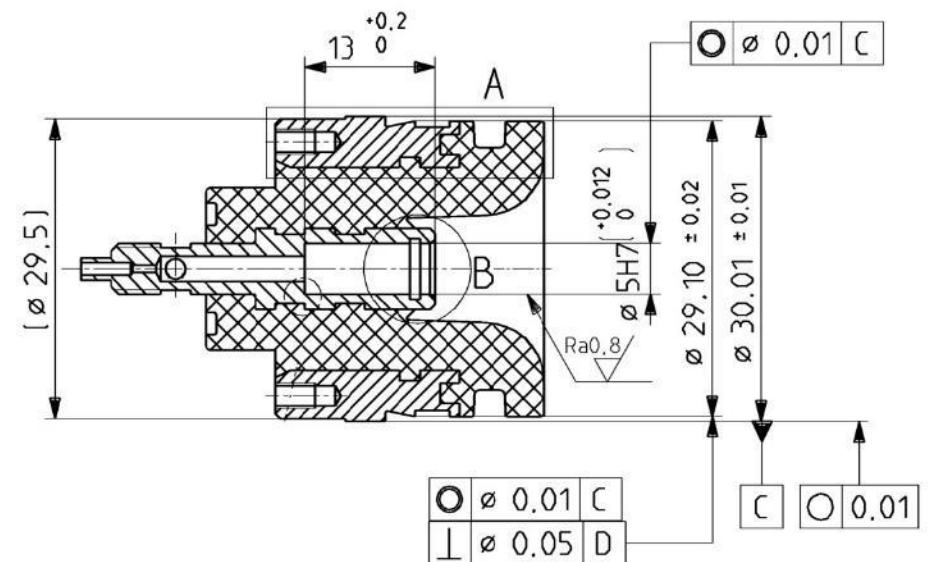
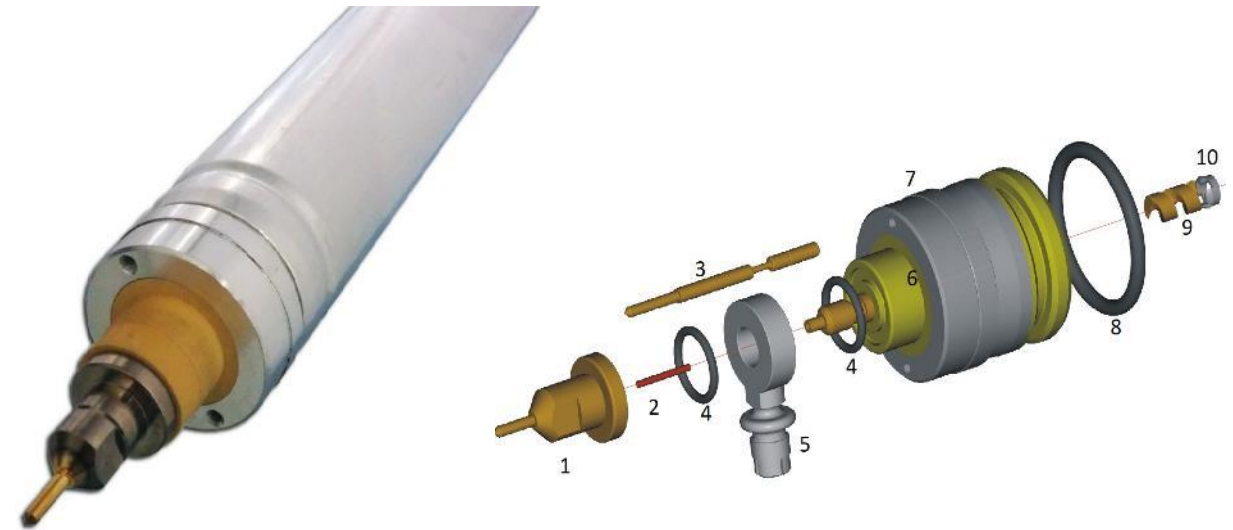
# მიონური სპექტრომეტრი: MDT კამერა (Monitored Drift Tube chamber)



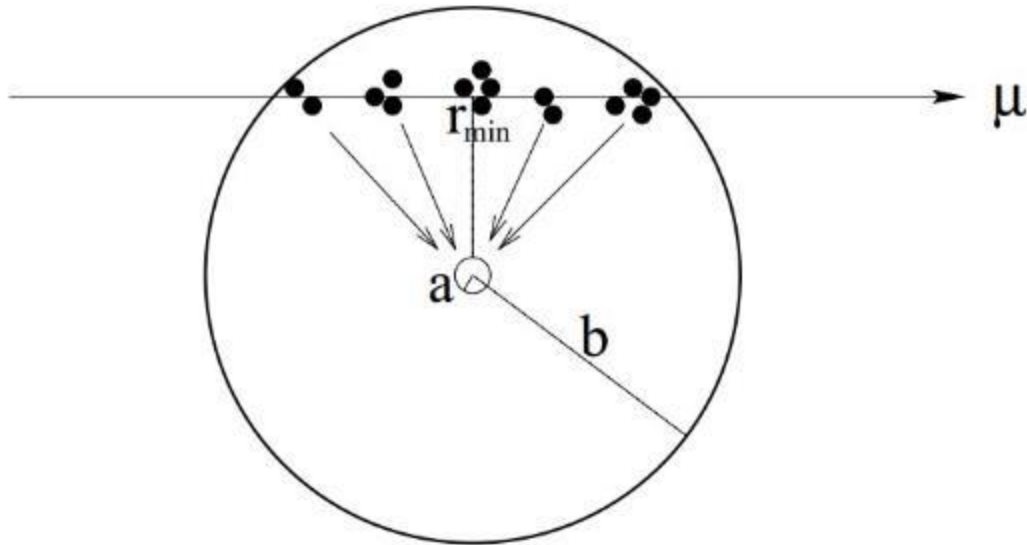
- დამზადებული მინიმუმ 20 მკმ მექანიკური სიზუსტით, MDT კამერები საგულდაგულოდ კონტროლდება ATLAS დეტექტორში - პოზიცია, შიდა დეფორმაციები, გარემო პირობები (ტემპერატურა და მაგნიტური ველი). შედგება ორი მრავალშრიანი (სუპერშრე) დრეიფული ცილინდრული დეტექტორებისაგან (DT), რომლებიც განლაგებულია ხისტი საყრდენი კონსტრუქციის (spacer) ორივე მხარეს. BO და BM კამერებში - 3 ფენა DT შრეში, BI კამერებისთვის - ოთხი.
- სპეისერის სტრუქტურული კომპონენტებია სამი განივი ფირფიტა (Cross-Plate), რომელზედაც წებდება DT და ორი გრძივი სხივი (Longitudinal Beam) განივი ფირფიტების დამაკავშირებელი. სპეისერი აღჭურვილია კამერის დეფორმაციის კონტროლის შიდა ოპტიკური სისტემით.

# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული მილები

პარამეტრი	მნიშვნელობა
მილის მატერიალი	Al, Mn (ALUMAN 100)
გარეთა დიამეტრი	$29.970 \pm 0.015$ მმ
კედლის სისქე	$400 \pm 20$ MKM
ანოდის მატერიალი	W-Re (97%,3%)
ანოდის დიამეტრი	$50 \pm 0.5$ MKM
გაზი	ArCO <sub>2</sub> (93:7)
გაზის წნევა	3 ატმ. (აბს.)
გაზური გაძლიერება	$2 \times 10^4$
ანოდის პოტენციალი	3080 ვ
დრეიფის მაქსიმალური დრო	750 ნწ
მილის საშუალო სივრცითი გარჩევითობა	75 მკმ



# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული მილის მოქმედების პრინციპი



ელექტრონების დრეიფი ანოდისკენ რადიალური

ელექტრული ველით  $E(r) = \frac{U}{r \ln(b/a)}$

შოტკი-რამოს თეორემა  $i(t) = -\frac{e}{U} v(t) E(r) \rightarrow$

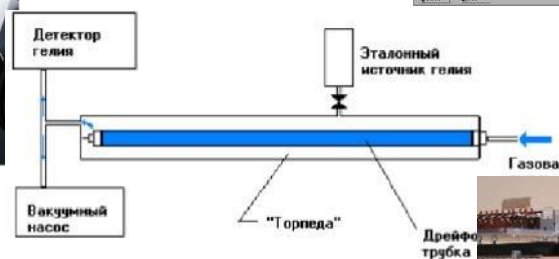
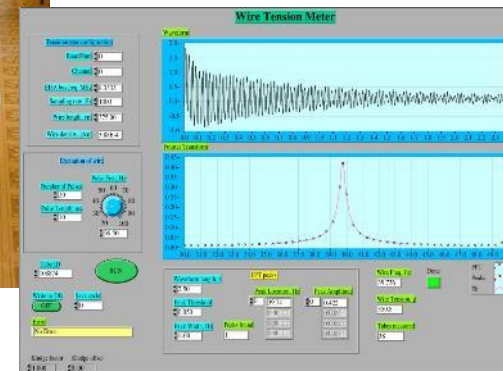
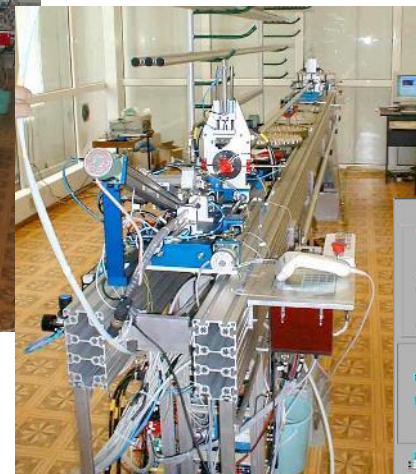
$i(t) = \frac{e}{2 \ln(b/a)} \cdot \frac{1}{t + t_0}$ , სადაც  $\begin{cases} 0 \leq t \leq t_{max}, t_0 = \frac{a^2}{2\mu U} \cdot \ln(b/a) \\ t_{max} = \int_a^b \frac{dr}{\mu E(r)} = \frac{b^2 - a^2}{2\mu U} \cdot \ln(b/a) \end{cases}$

საბოლოოდ, სიგნალი იკითხება დრეიფული მილის ერთი მხრიდან, ძლიერდება მუხტისადმი მგრძნობიარე გამაძლიერებლით მიეწოდება დისკრიმინატორს. დისკრიმინატორის ლოგიკური გამოსავალიდან სიგნალი მიეწოდება ე.წ. Time-to-Digital Converter (TDC), რომელიც ზომავს დროის სხვაობას მიონის იმპულსსა და ტრიგერის სიგნალს შორის. ეს დროის სხვაობა არის დრეიფის დრო + მუდმივი დროითი წანაცვლება ელექტრონიკაში სიგნალის გავრცელების დროის გამო.

ამრიგად, თუ ვიცით ე. წ. სივრცე-დრეიფის დროის თანაფარდობა (r-t - თანაფარდობა), შეგვიძლია გამოვთვალოთ იმ წრის რადიუსი  $r(min)$ , რომელსაც ეხება მიონის ტრეკი  $\rightarrow$  უწყვეტი ავტოკალიბრაციის პროცედურა სამი ე.წ. კალიბრაციის ცენტრებიდან.

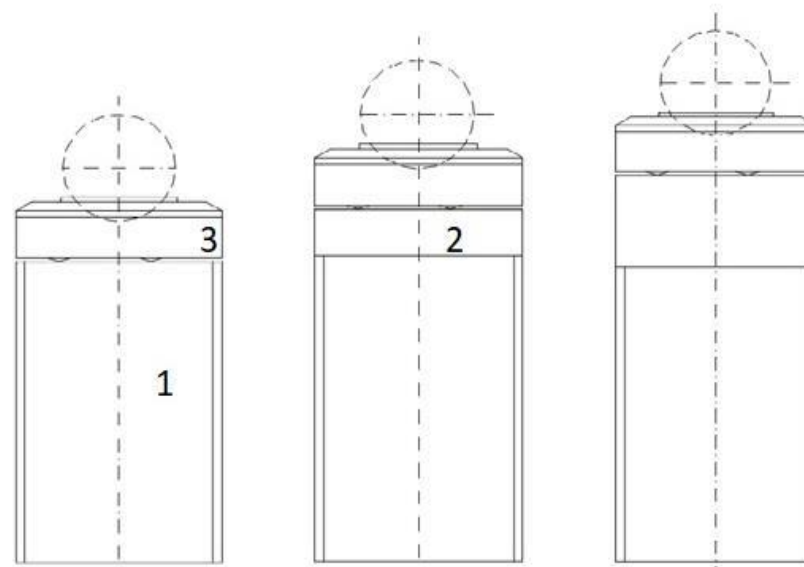
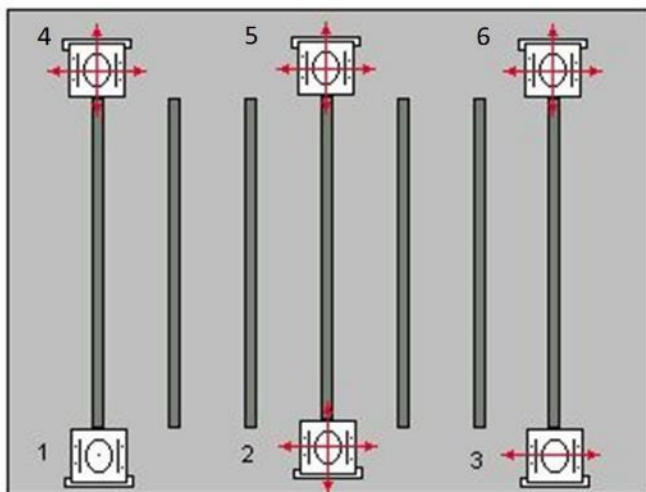
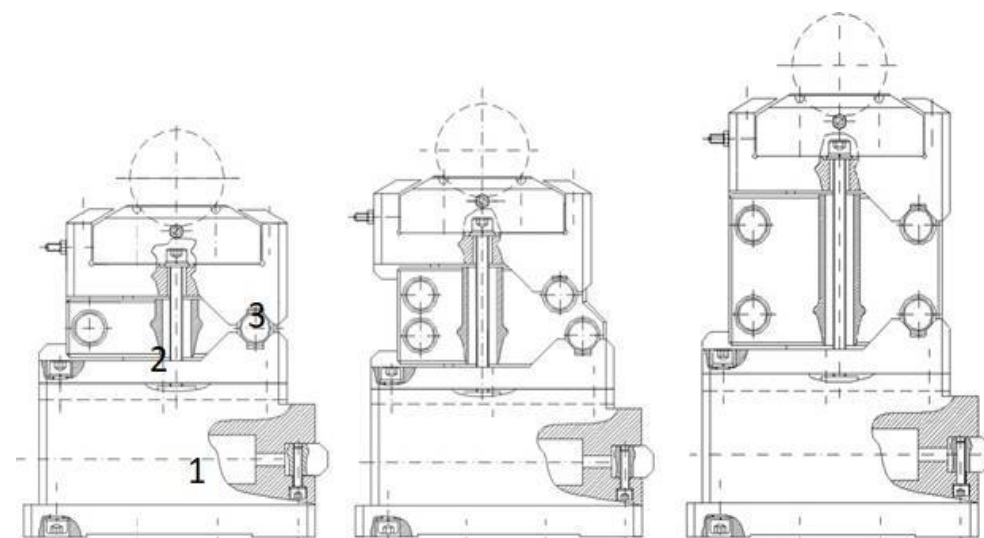
# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული მილების წარმოება

- 1) ალუმინის მილების გეომეტრიული მახასიათებლების გასაზომი სტენდი - კედლის სისქე ( $0,400 \pm 0,03$ ) მმ გარე დიამეტრი ( $29,97 \pm 0,015$ ) მმ
- 2) ნახევრადავტომატური საწარმოო ხაზი
- 3) ანოდის დაჭიმულობის გასაზომი სტენდი - ( $350 \pm 1$ ) გრ.
- 4) ანოდის პოზიციის გასაზომი სტენდი
- 5) ჰერმეტიულობის გასაზომი სტენდი –  $10^{-8}$  ბარი·ლ/წმ
- 6) მაღალ დამაბულობაზე გასაზომის სტენდი



# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული კამერის (MDT) წარმოება

$\sigma_{MDT} \leq 20$  მკმ ზუსტი ხელსაწყოები - გრანიტის მაგიდა, საყრდენი ხაზების მატრიცა, ზუსტი კოშკები

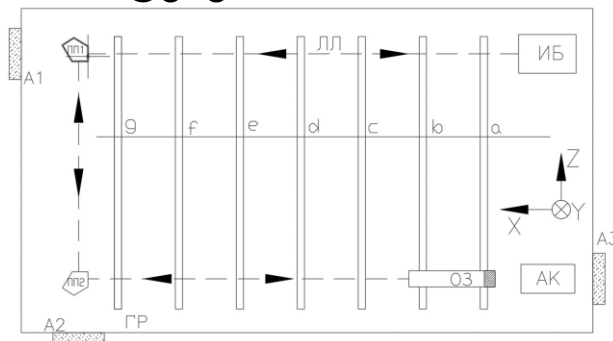




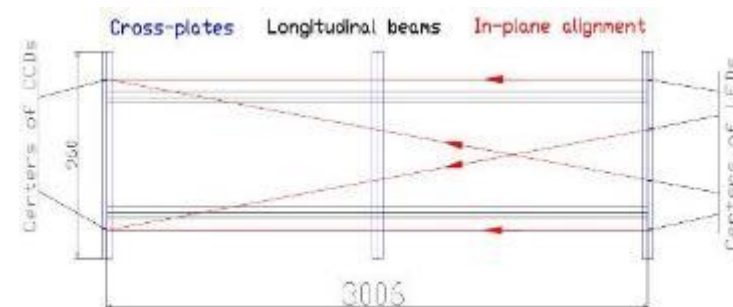
# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული კამერის (MDT) წარმოება

იუსტირებისა და წარმოების კონტროლის ოპტიკური სისტემები

1) საყრდენი ხაზების მატრიცის იუსტირების სისტემა



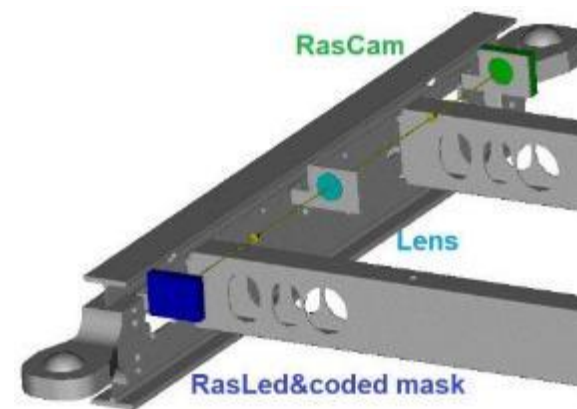
2) კამერის დეფორმაციის კონტროლისთვის ოპტიკური სისტემა (RASNIK)



3) გარე კონტროლის ოპტიკური სისტემა (RasAss)



4) განივი ჩაზნექვის მონიტორინგის სისტემა



# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული კამერის (MDT) წარმოება

## დამხმარე სისტემები

1) ნახევრადავტომატური დაწებების მანქანა



2) ჩაზნევის კომპლექსის სისტემა



1) ჩაზნევის რეგულირების სისტემა



# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული კამერის (MDT) წარმოება

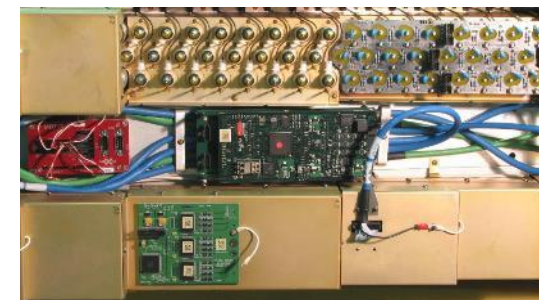


# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული კამერის (MDT) წარმოება

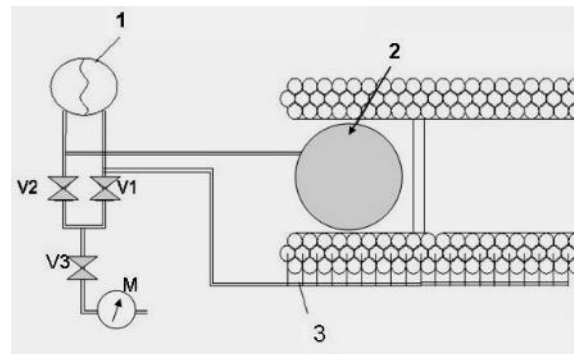
## ფინალიზაცია

### 1) აღჭურვა:

- გაზის განაწილების სისტემა
- 10 ტემპერატურული სენსორი
- 2 მაგნიტური ველის სენსორი
- RASNIK-სისტემები კამერის პოზიციონირების და მონიტორინგისთვის;
- ელექტრონიკის კამერული ნაწილი (on-chamber)
- სხვადასხვა შეერთებები

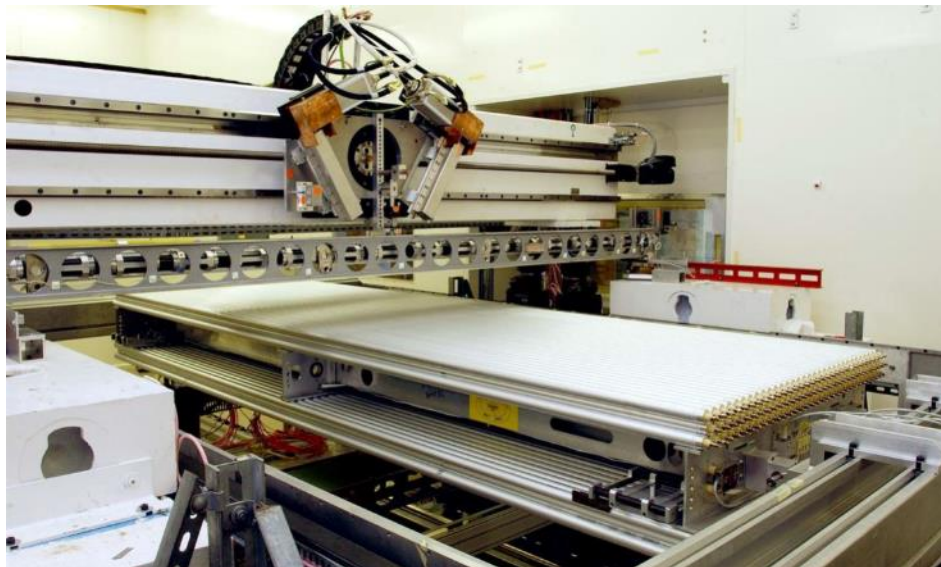


### 2) საბოლოო ტესტი გერმეტიულობაზე



$$L \approx 2 \cdot 10^{-8} \cdot N_{tubes} \text{ ლ} \cdot \text{ბარი} \cdot \text{წმ}^{-1}$$

# მიონური სპექტრომეტრი: დრეიფული კამერის (MDT) წარმოება



სულ გამოშვებული და დატესტირებული იქნა ~65 000 დრეიფული მილი (აქედან 40 000 MPI, მიუნხენისთვის) და 86 BMS/BMF ტიპის დრეიფული კამერა

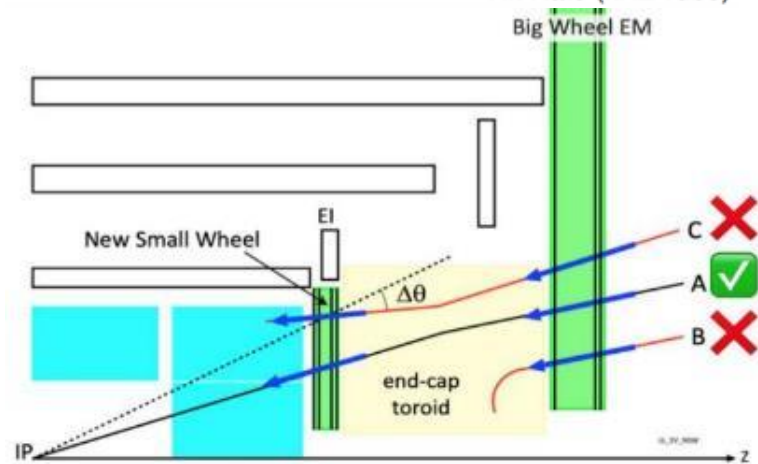
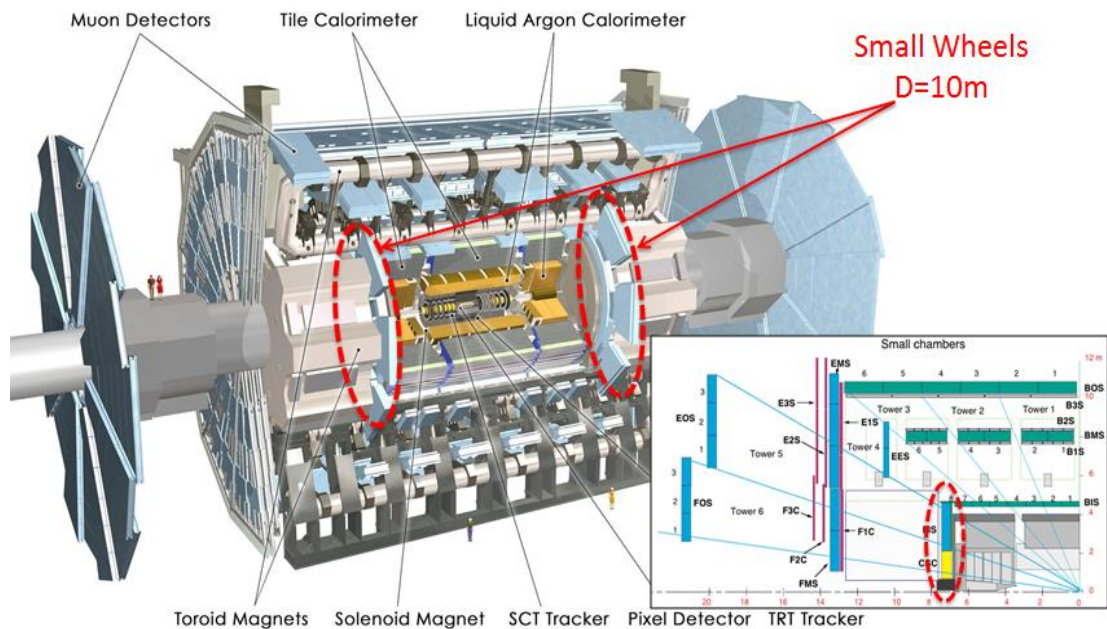
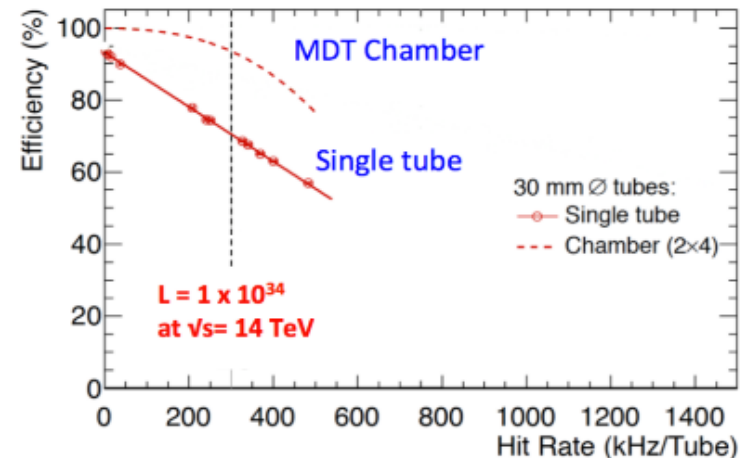
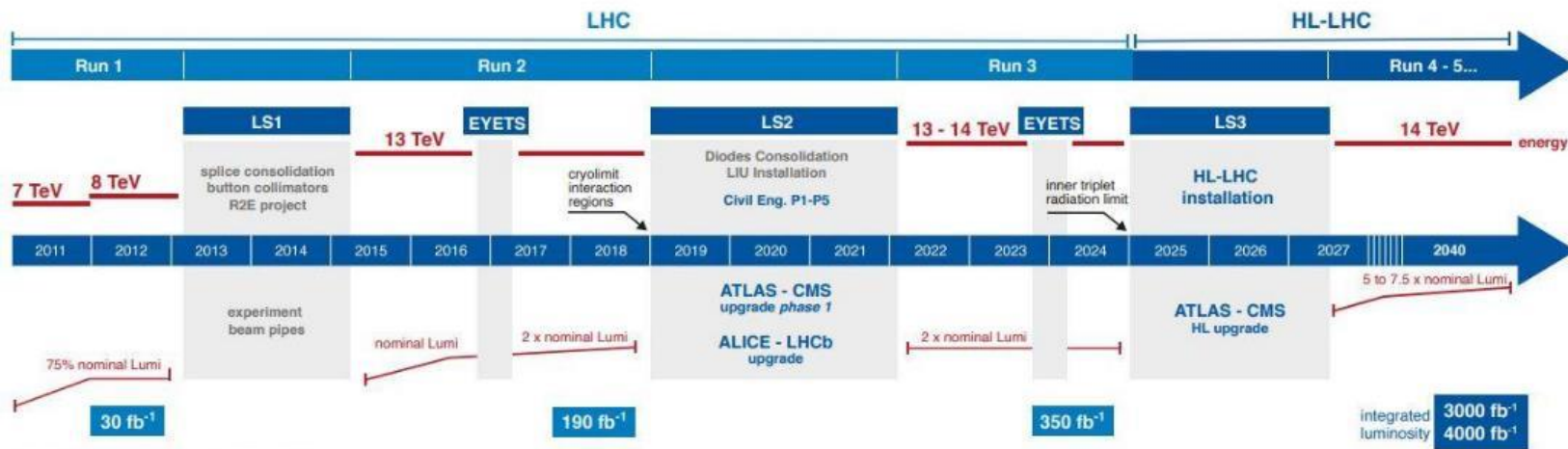


ქართული ჯგუფი: ედიშერ ცხადაძე, ალექსი ლონდაძე, ირმა ლონდაძე, გოგი ლლონტი, ლალი ლლონტი

# ATLAS განახლება (Upgrade)

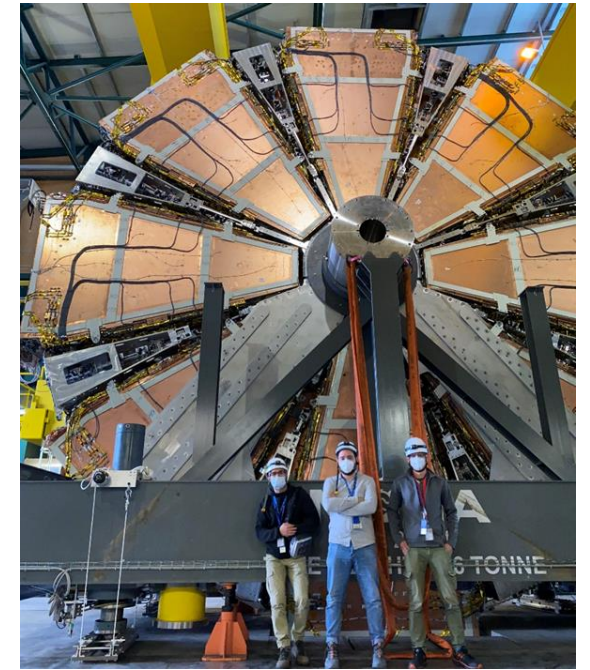
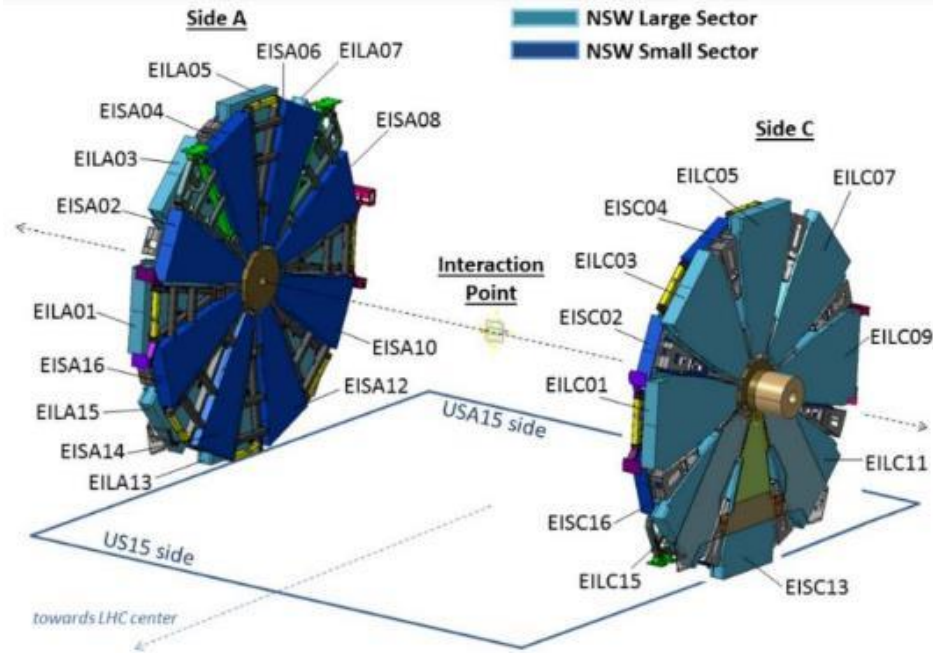
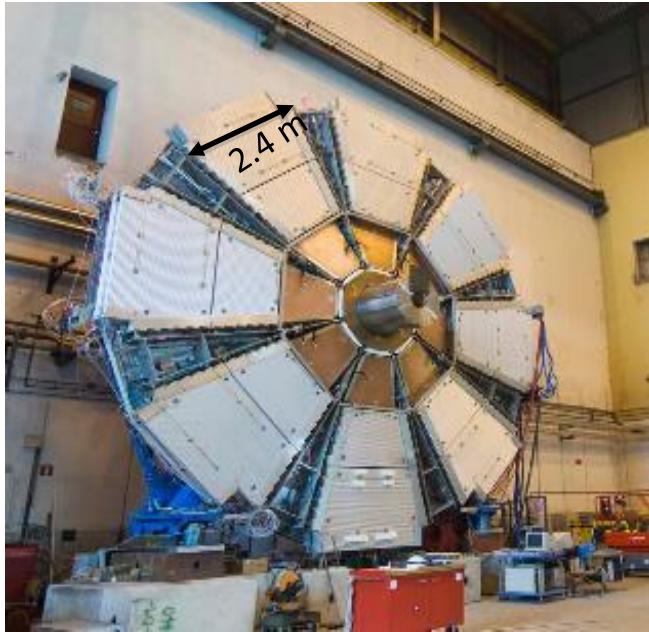


## LHC / HL-LHC Plan

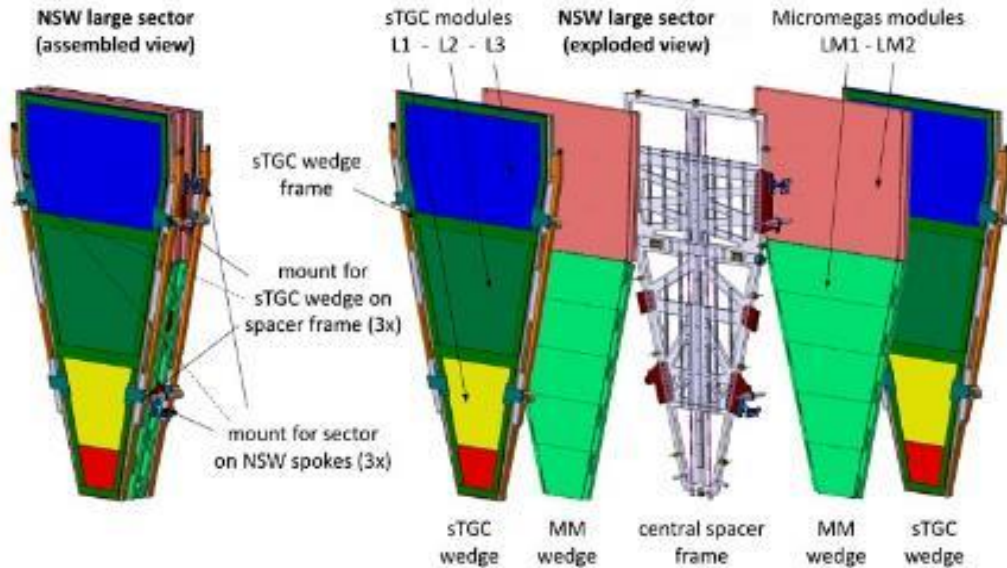


- MDT-ს მახასიათებლების დეგრადაცია
- ყალბი ტრიგერების დიდი რაოდენობა (90% 2012-ის მონაცემებში)

# ATLAS განახლება - „ახალი მცირე ბორბლები“ (New Small Wheels)



Micromegas+sTGC



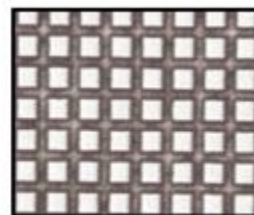
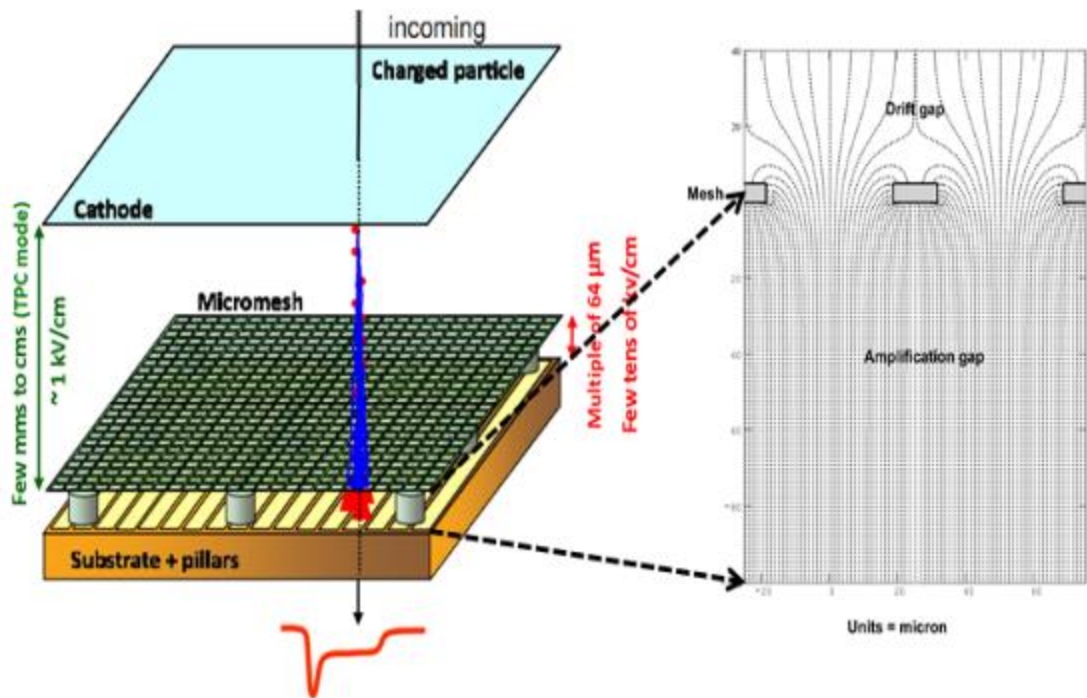
- 16 სექტორი (8 დიდი და 8 პატარა)
- განლაგების სქემა სოლში: sTGC – Micromegas – Micromegas – sTGC

# ATLAS განახლება - Micromegas დეტექტორი

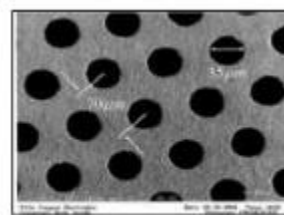


## „Micromegas“ (MICRO-MESH Gaseous Structure)

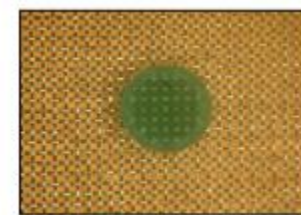
- პლანარული გეომეტრია
- მარტივი კომპონენტები: კათოდი, ამოკითხვის საბეჭდი დაფა, ბადე
- იაფი
- დიდი ფართობის დეტექტორების შექმნის შესაძლებლობა
- ინდუსტრიალიზაცია (სტანდარტული ფოტოლიტოგრაფია)



Electroformed



Chemically etched



Woven



Deposited by vaporization



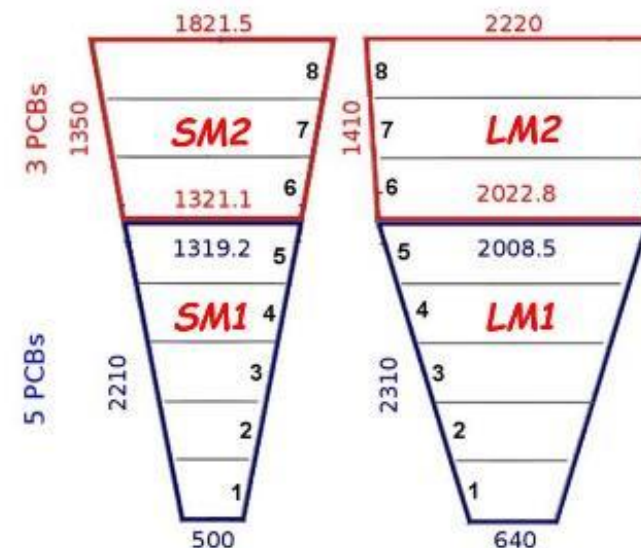
# ATLAS განახლება - Micromegas დეტექტორი

## მმ-ის მახასიათებლები და სამუშაო პარამეტრები

- ბადე: უჟანგავი ფოლადი, 325 lines / inch
- სამუშაო გაზი: Ar:CO<sub>2</sub> (93:7)
- გაძლიერების არე: 128 მკმ,
- იონიზაციის/დრეიფული არე: 5 მმ
- გაძლიერების ველი: 40 ვ/სმ
- დრეიფული ველი: 600 ვ/სმ
- სტრიპების ბიჯი: 0,425-0,445 მმ
- რეზისტული სტრიპები: 20-30 მომი/სმ
- HV (რეზისტული სტრიპები): 550 ვ (ბადე GND)

### კვადრუპლექტისთვის:

- 2 შრე ეტა სტრიპები
- 2 შრე სტერეო სტრიპები ( $\pm 1.5^\circ$ )
- მექანიკური სიზუსტე: 40 მკმ

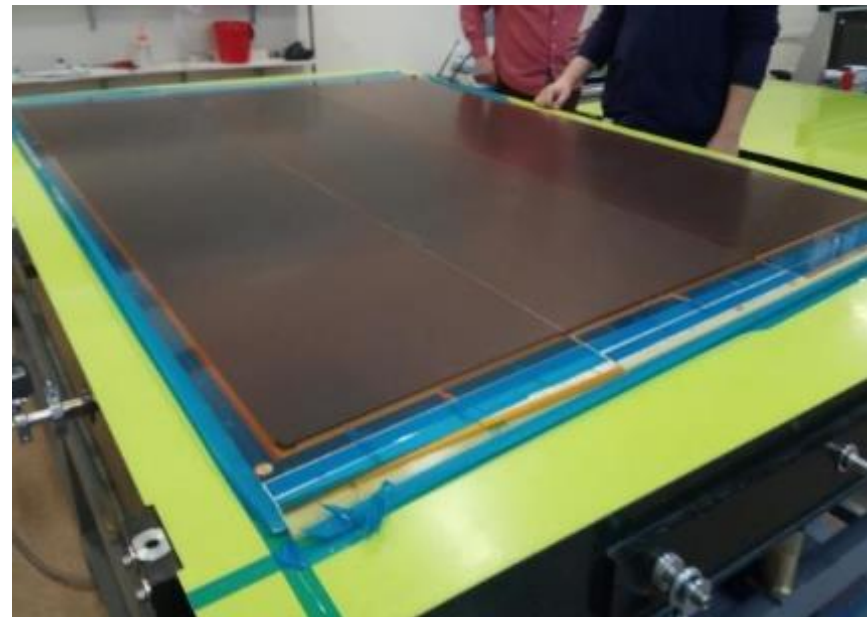


# ATLAS განახლება - Micromegas დეტექტორი

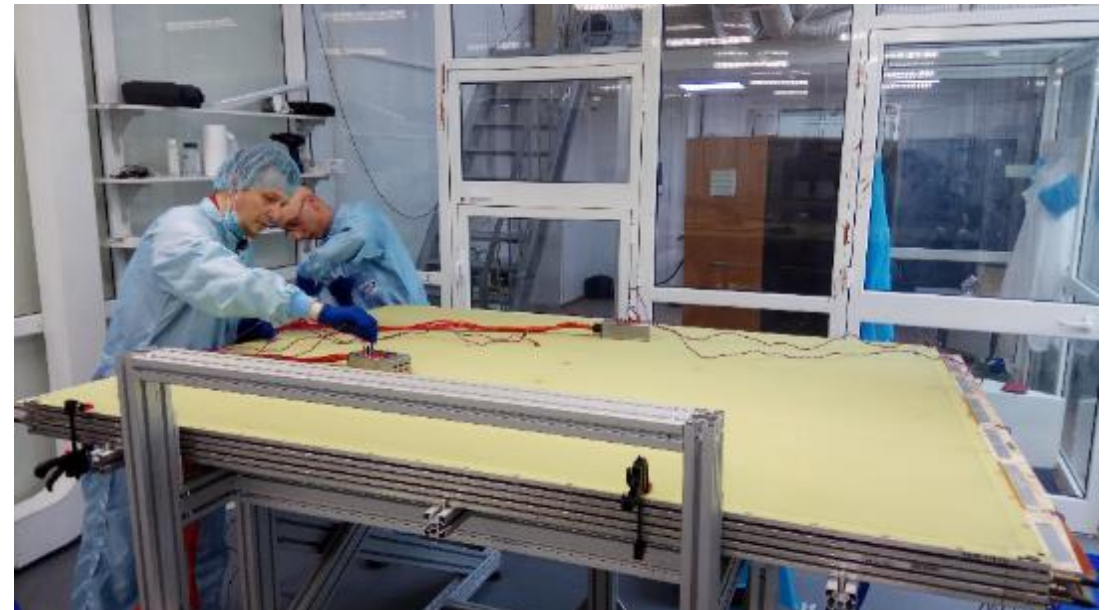
ზუსტი აღჭურვილობა: 1- ვაკუუმური მაგიდები, 2 – სამონტაჟო მაგიდა, 3 – გრანიტის მაგიდა



# ATLAS განახლება - Micromegas დეტექტორი

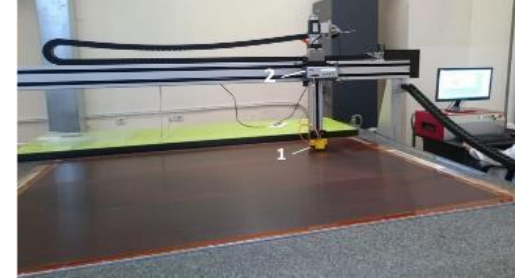


# ATLAS განახლება - Micromegas დეტექტორი

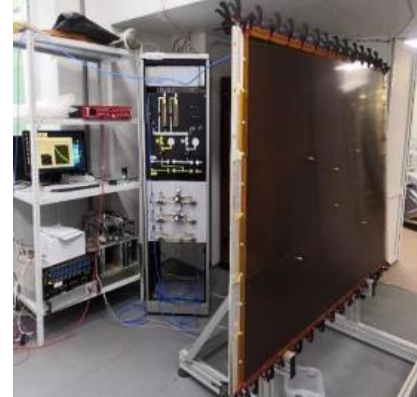


# ATLAS განახლება - Micromegas დეტექტორი

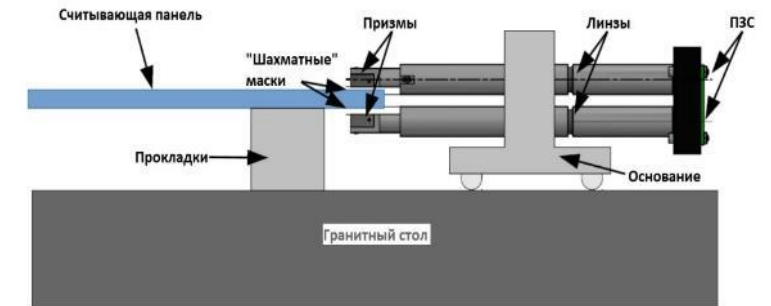
1) სამლერძიანი ხაზოვანი მოდული ოპტიკური ზონდით პანელის სისქისა და სიბრტყის გაზომვისთვის (დაშვება  $\pm 110$  მკმ)



2) ჰერმეტიკობის შესამოწმებელი 2 სტენდი ( $L=10^{-6}$  ბარი·ლ/წმ)



3) წანაცვლების გასაზომი სტენდი (Side-to-side alignment, Panel-to-panel Alignment)

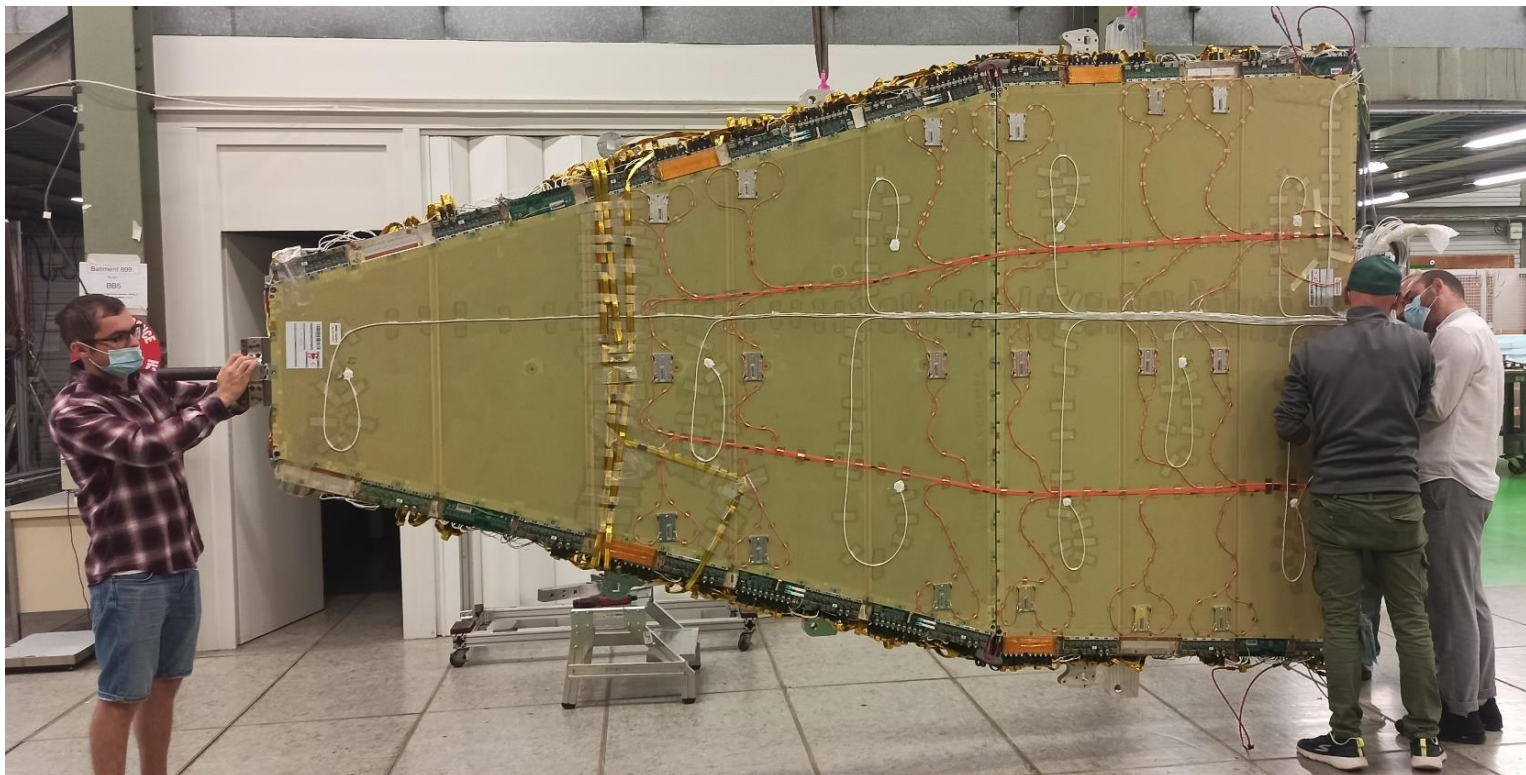


4) მაღალ დაბვაზე ტესტირების სტენდი

5) კოსმოსურ სხივებზე ტესტირების სტენდი



# ATLAS განახლება - Micromegas დეტექტორი



Micromegas-ის სოლის აღჭურვა (BB5, CERN): ლ. ღონლაძე, ი.მინაშვილი უმ., ბ.ბუაძე

ქართული ჯგუფი: ბექა ბუაძე, ი.მინაშვილი უმ., ალექსი ღონლაძე, ირმა ღონლაძე, ლევან ღონლაძე, ზაზა ჩუბინიძე

სულ გამოშვებული და  
დატესტირებული იქნა 70  
Micromegas-ის RO პანელი და 33  
მოდული მათ ბაზაზე (300 მ<sup>2</sup> ორივე  
ორბლის მთლიანი 1200 მ<sup>2</sup>-დან)



**დიდი მადლობა!!!**

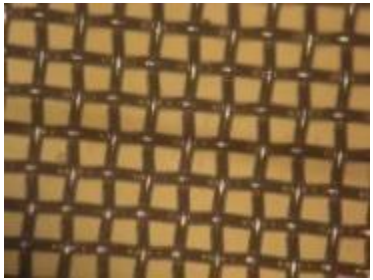
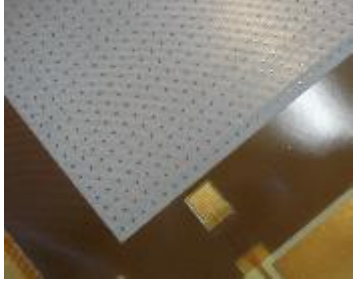


# *Extra Slides*



# Bulk MM

(I. Giomataris et al., «Micromegas in a bulk,» NIMA 560 (2006) 405)



1) Gerber file → PCB industry →

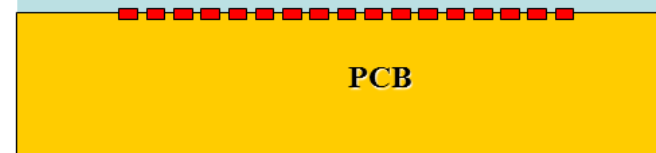


+ფოტონილაბი

2) ფოტორეზისტიული ფირით ლამინირება  
DuPont Pyralux PC1000 (25, 38, 51 და 64 მკმ)

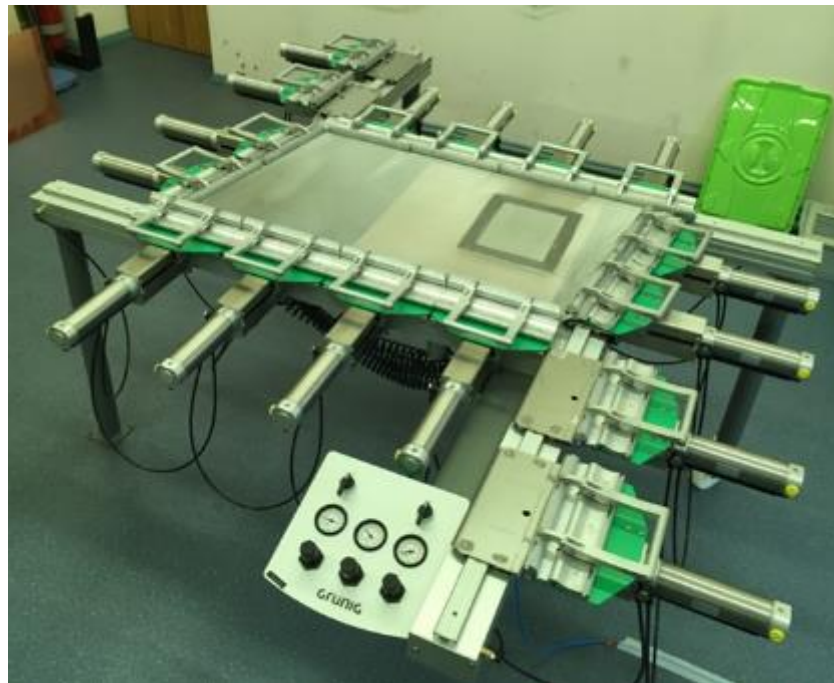
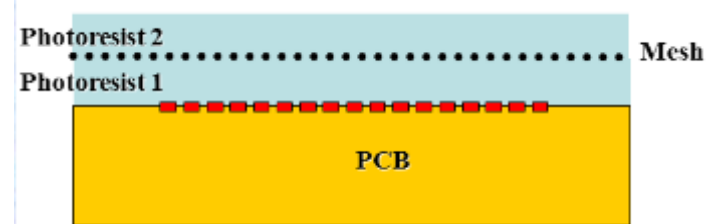
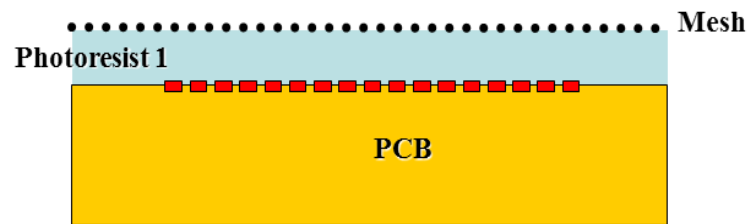


Photoresist 1



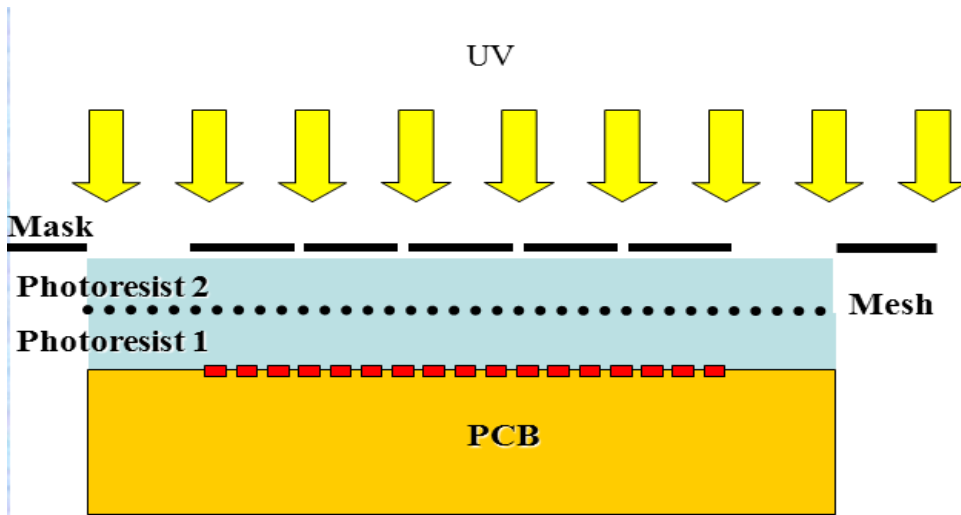
# Bulk MM

3)-4) ჩარჩოზე დამაგრებული ბადის დადება და კიდევ ერთხელ ლამინირება ბადის შესაკავებლად



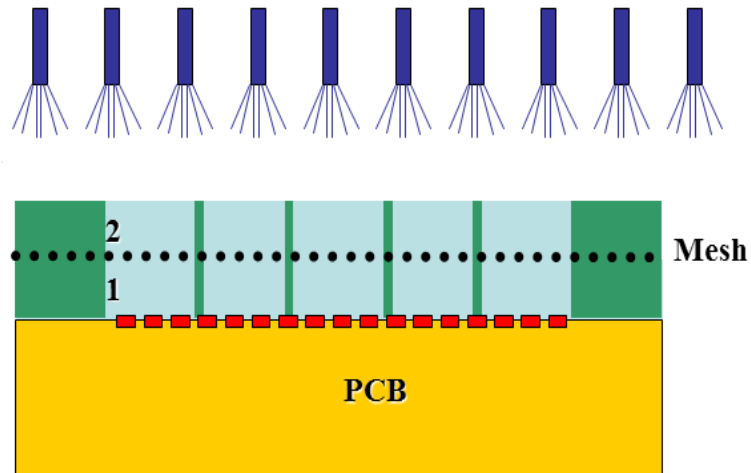
# Bulk MM

5) მიღებულ სტრუქტურაზე იდება ფოტონილაბი და ხდება ულტრაიისფრით დასხივება



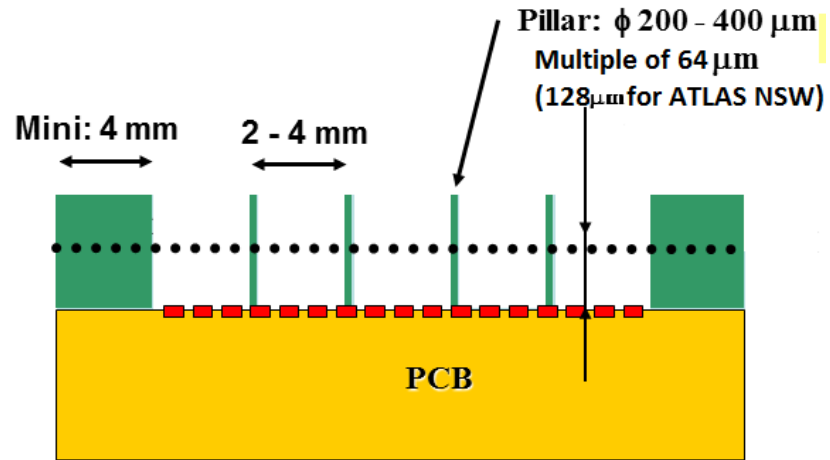
# Bulk MM

6) ქიმიური მოწამვლა 1% ნატრიუმის კარბონატის ხსნარით (E500 კვების მრეწველობაში).

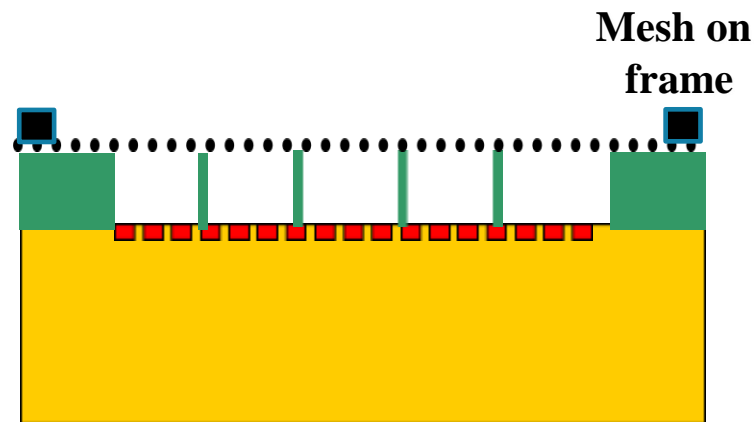


# Bulk MM

7) დეიონიზირებული წყლით გარეცხვა და გამრობა საშრობ კარადაში (4 საათი 140°C).



Bulk



Floating mesh

