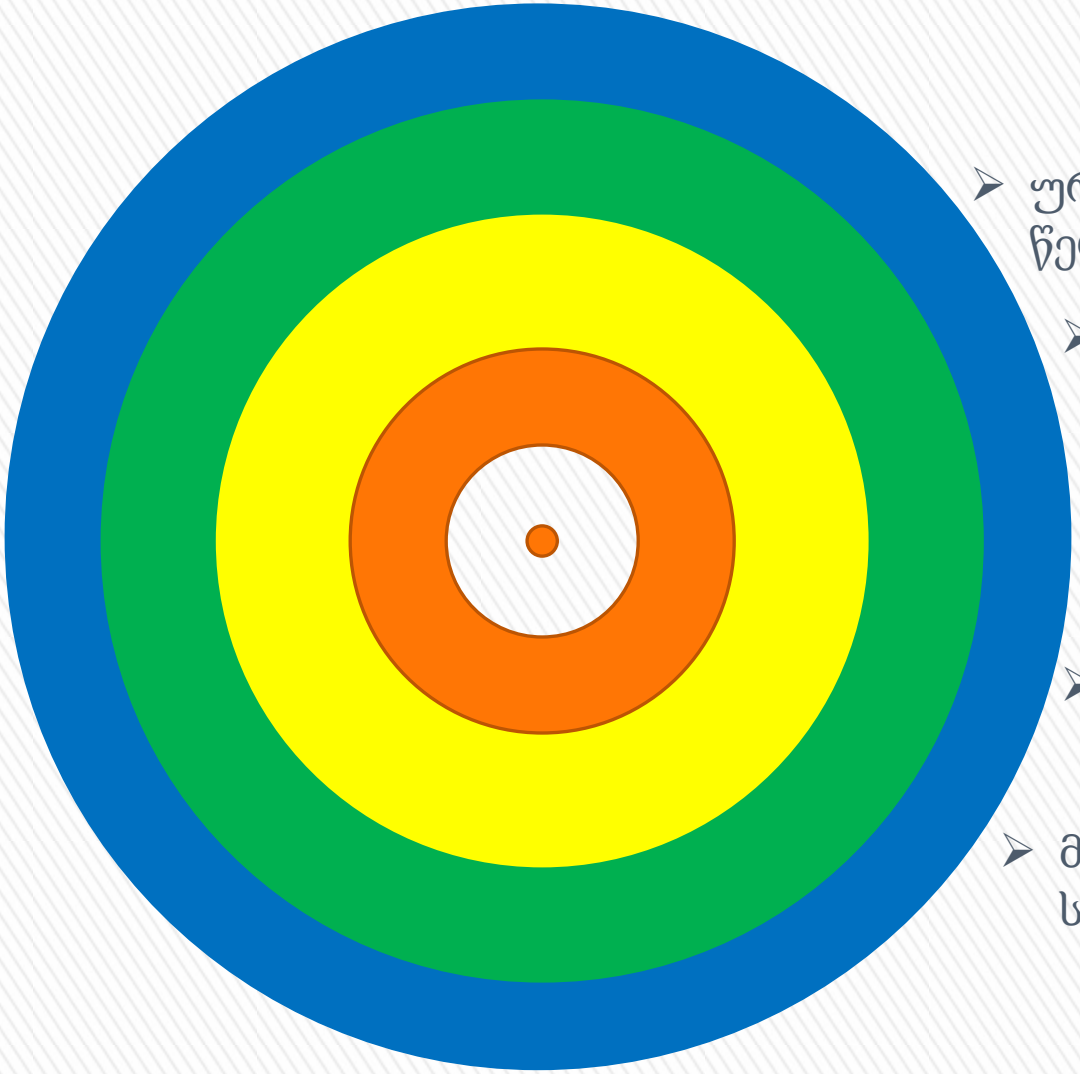
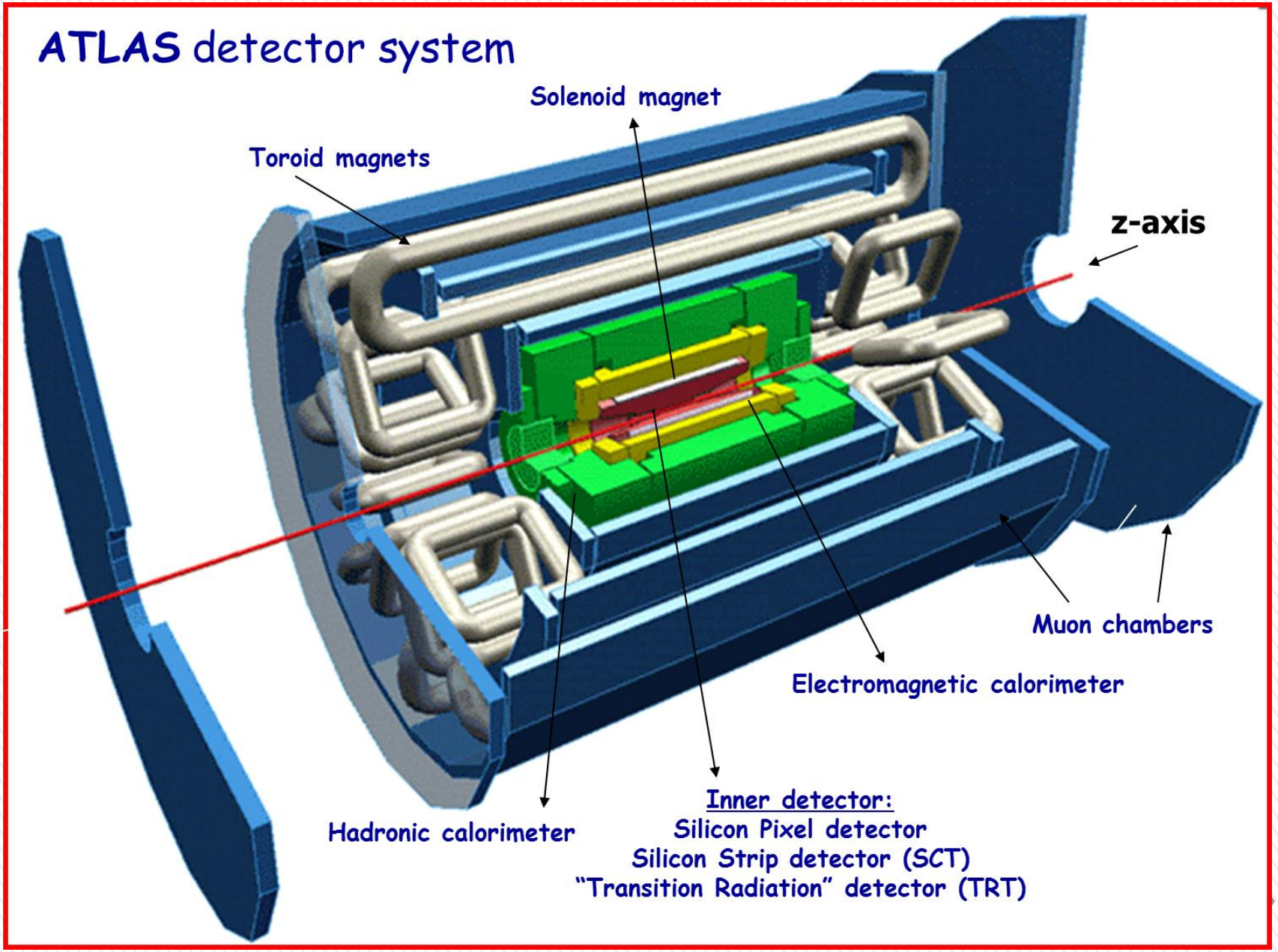
ელემენტარული ნაწილაკების დეტექტირების პრინციპები და დეტექტორები

თანამედროვე ექსპერიმენტული დანადგარები



- ურთიერთქმედების წერტილი
- შიდა დეტექტორი (ტრეკერი)
- ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრი
- ადრონული კალორიმეტრი
- მიონური სპექტრომეტრი

ATLAS detector system



ნაწილაკების დეტექტირების პრინციპები

ნაწილაკების დეტექტირებას საფუძვლად უდევს მათი ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების უნარი.
ეს ურთიერთქმედება შეიძლება სხვადასხვა სახის იყოს:

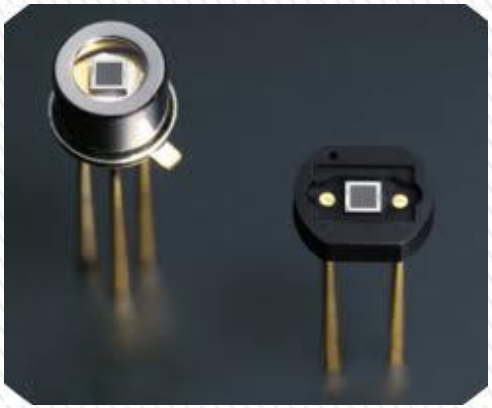
- ✓ ფოტოეფექტი
- ✓ ჩერენკოვის გამოსხივება
- ✓ ბრემსშტრალუნგი - დამუხტული ნაწილაკის მიერ გამოსხივება ელექტრულ ველში გაბნევისას
- ✓ ადრონული და ელექტრომაგნიტური ღვარების წარმოქმნა
- ✓ იონიზაცია
- ✓ წყვილთა წარმოქმნა

ფოტო დეტექტორები

ფოტო დეტექტორების მუშაობის პრინციპი დამყარებულია ფოტოეფქეტზე.
მრავალგვარი ფოტო დეტექტორები არსებობს - განსხვავდებიან მხოლოდ ფოტოელექტრონების შეგროვების მეთოდებით, მოდებული ძაბვის სიდიდით, გაზომვის სიზუსტით, ზომებით...

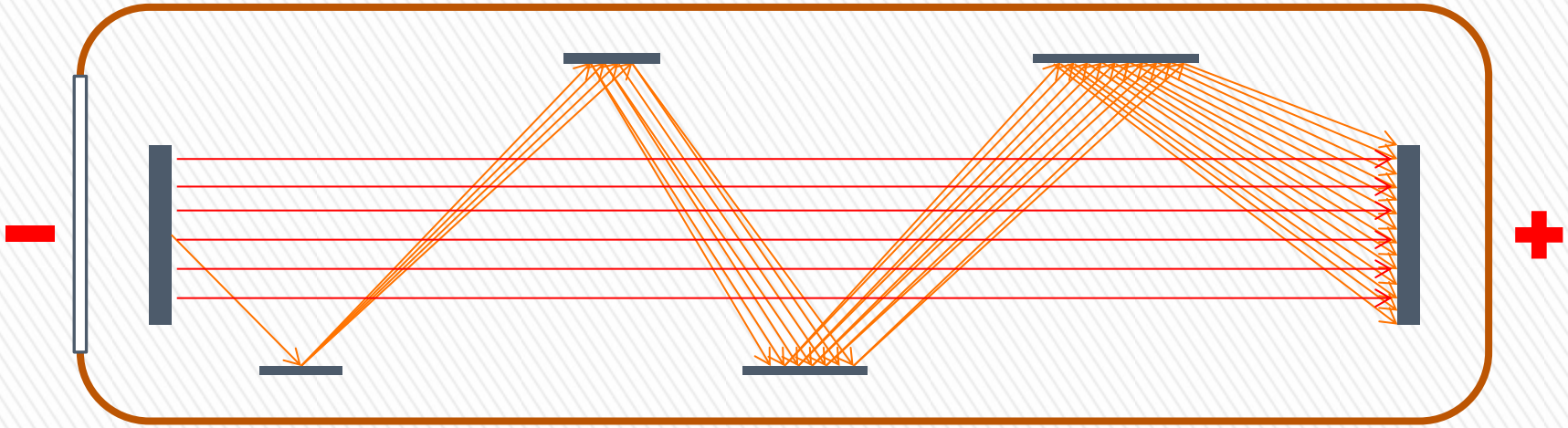
ფოტოგამამრავლებელი

ზვავური ფოტო დეტექტორი



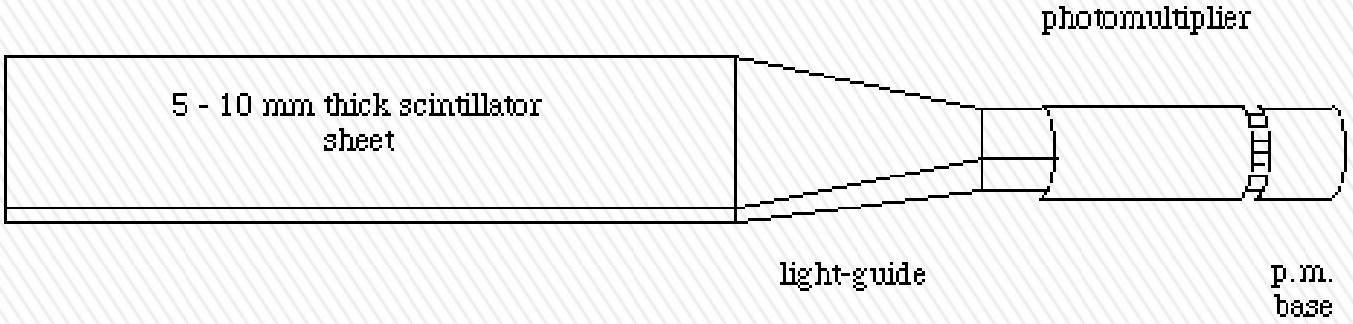
სილიკონური ფოტოგამამრავლებელი

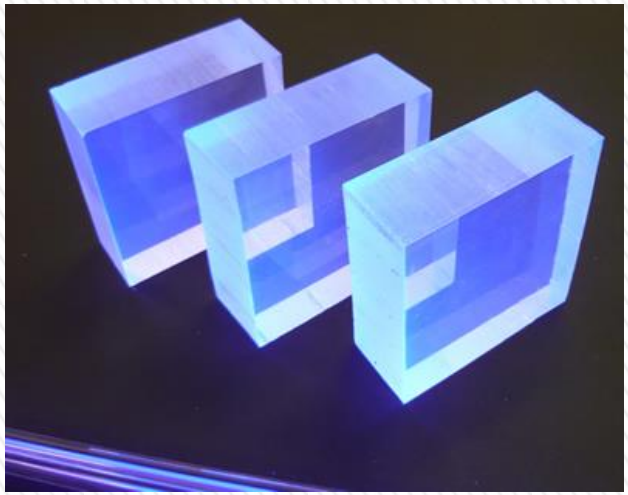
ფოტო-გამამრავლებელი



- შუქის მიმართ დიდი მგრძნობიარობა
- დიდი გაძლიერების კოეფიციენტი $\sim 10^7$
- წრფივი მახასიათებლები
- დიდი სისწრაფე - სიგნალის ხანგრძლივობა $\sim 10^{-9}$ წმ

სცინტილატორები





ორგანული სცინტილატორი

არა ორგანული სცინტილატორი - BGO

კალორიმეტრია

- კალორიმეტრია ერთ-ერთი ყველაზე ძირითადი მეთოდია ელემენტარული ნაწილაკების ექსპერიმენტალურ ფიზიკაში
- ნეიტრალური ნაწილაკების დეტექტირებისა და ენერგიის გაზომვის ერთადერთი საშუალებაა კალორიმეტრია

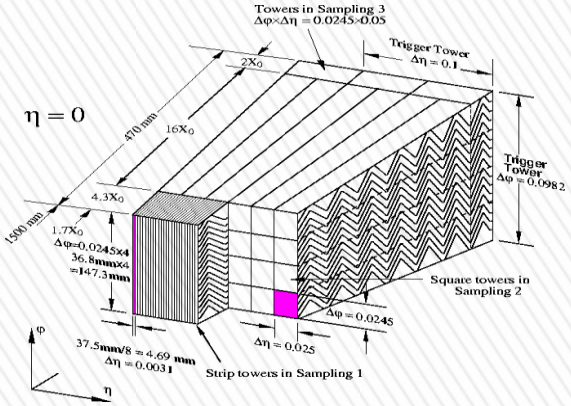
არსებობს ორი ტიპის კალორიმეტრები - **ელექტრომაგნიტური** და **ადრონული**.

- ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრები გამოიყენება იმ ნაწილაკების ენერგიის გასაზომად, რობლებიც მხოლოდ ელექტრომაგნიტურ ურთიერთქმედებაში იღებენ მონაწილეობას - ელექტრონი, პოზიტრონი და გამა ქვანტი
- ადრონული კალორიმეტრები ზომავენ ძლიერად ურთიერთმომქმედ ნაწილაკების - **ადრონების** - ენერგიას

კალორიმეტრია

კალორიმეტრები მოწყობილნი არიან შემდეგნაირად

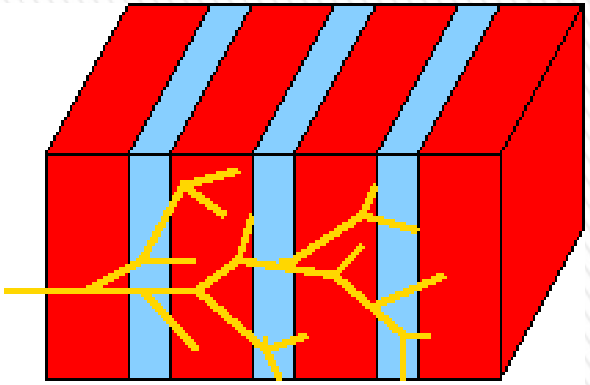
- შთანმთქმელი - ნივთიერება, რომელშიც ხდება ნაწილაკის სრული დამუხრუჭება, ნაწილაკი კარგავს მთელ თავის ერენგიას, ვითარდება კასკადური პროცესი - მეორადი ნაწილაკების ღვარი
- სენსორები, რომლებიც ახდენენ მეორადი ურთიერთქმედების შედეგად წარმოქმნილი სიგნალის გაზომვას



ექსპერიმეტ ATLAS - ის თხევადი არგონის კალორიმეტრი

მეორადი ნაწილაკების მუხტის შეგროვება ხდება თხევად არგონში მოთავსებული ზიგზაგის ფორმის სპილენძის ელექტროდებით.

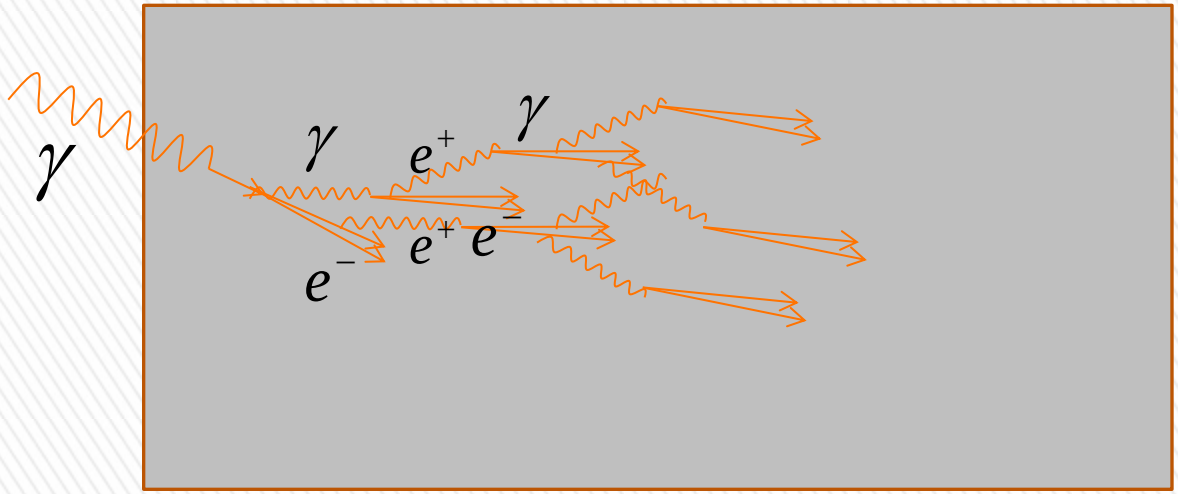
კალორიმეტრი, სადაც მშთანმთქმელი და აქტიური ნაწილი (სცინტილატორის ფირფიტები) ერთმანეთის მონაცვლეობითაა განლაგებული



ელექტრომაგნიტური ღვარის წარმოქმნა

რა პროცესები მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში:

- წყვილთა წარმოქმნა - გამა ქვანტები
- ბირთვის ელექტრულ ველში გაბნევა - ბრემსშტრალუნგი - ელექტრონები



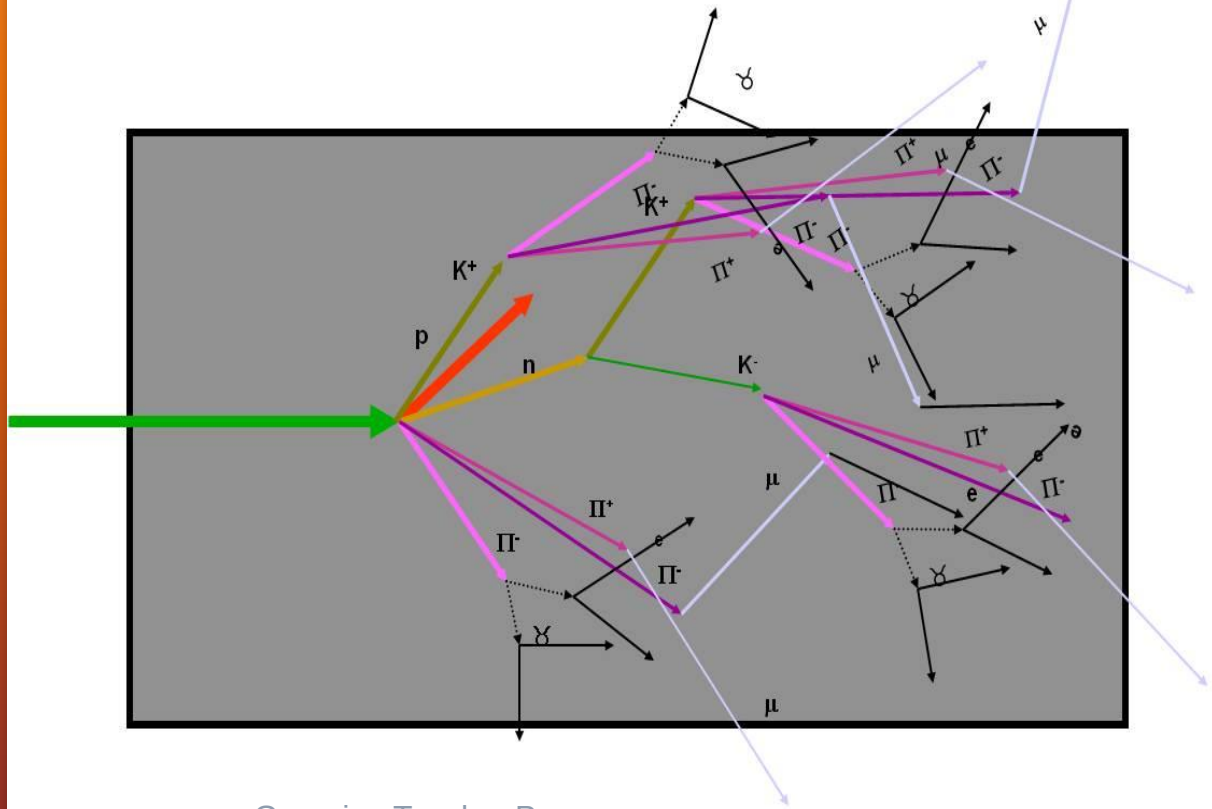
ასე ვითარდება ელექტრომაგნიტური ღვარი, სანამ მეორადი ნაწილაკების ენერგია არ დავა გარკვეულ კრიტიკულ ენერგიამდე.

ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში ელექტრონები და ფოტონები გამოყოფენ თავისი ენერგიის 95 დან 100 % მდე. ამ ფაქტზეა დამყარებული ელექტრონების იდენტიფიკაცია

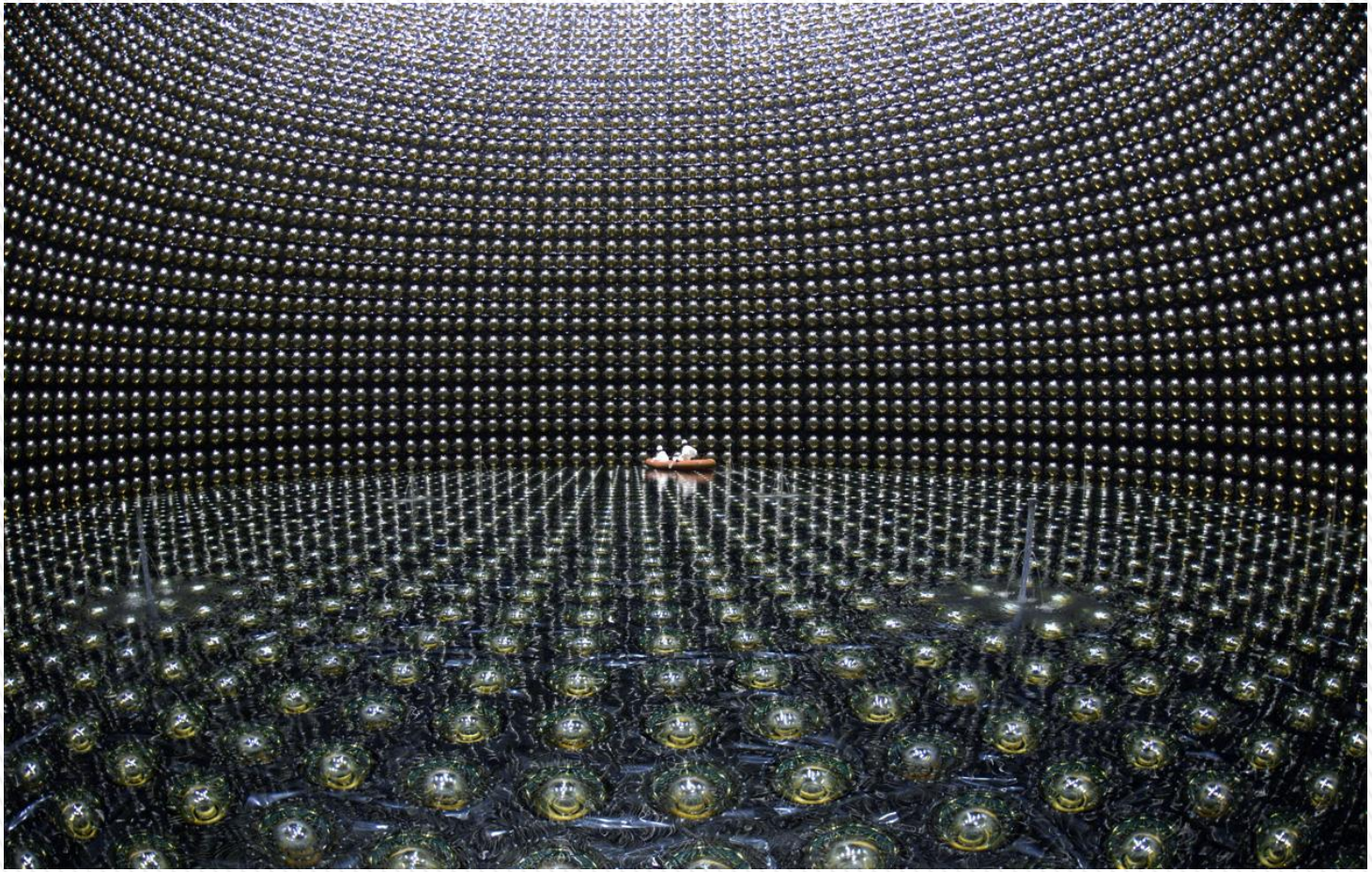
ადრონული ღვარის წარმოქმნა

ადრონი ნივთიერებაში მოხვედრისას გაცილებით დიდ მანძილზე შეაღწევს შიგნით, სანამ პირველ ურთიერთქმედებას განიცდის

ძლიერი ურთიერთქმედების შედეგად მეორადი ადრონები იბადებიან, რომლებიც ან თვითონვე ურთიერთქმედებენ ნივთიერებასთან, ან იშლებიან და ეს დაშლის პროდუქტები განიცდიან ურთიერთქმედებას

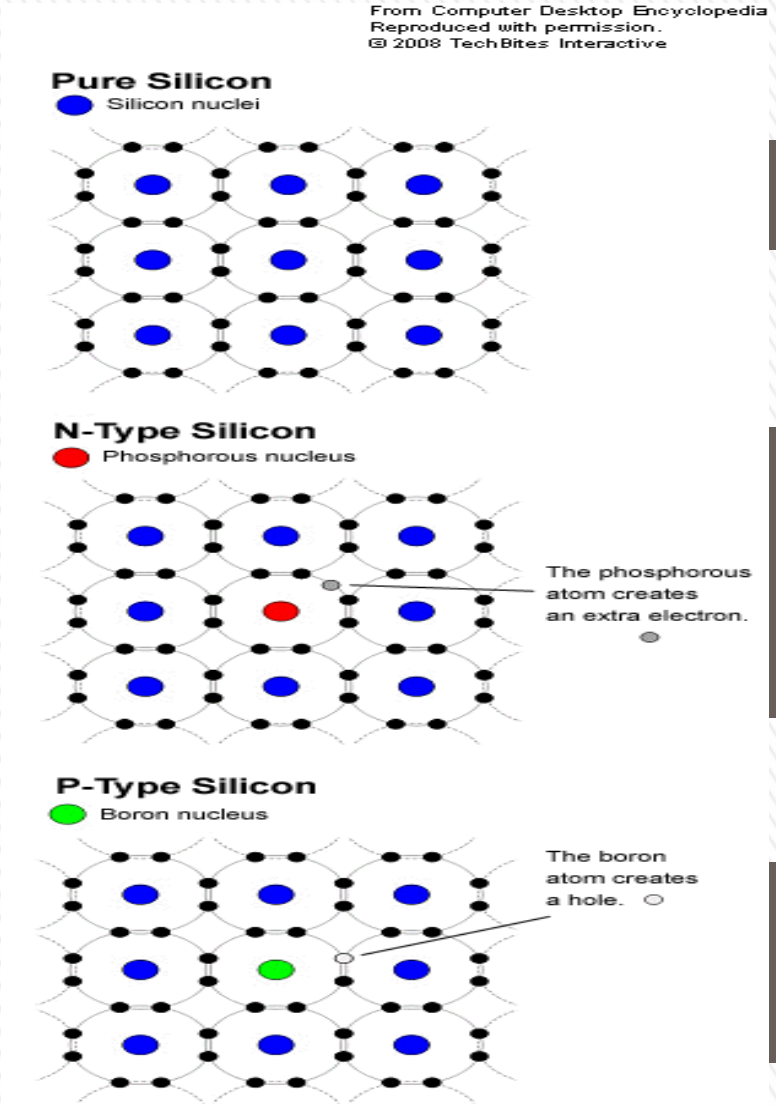


ზოგიერთმა ნაწილაკმა შეიძლება დატოვოს კალორიმეტრის ფარგლები



ექსპერიმენტ სუპერ კამიოკანდეს ექსპერიმენტული შახტა - კედლები "მოპირკეთებულია" ფოტო გამამრავლებლებით

სილიკონური დეტექტორები - ლეგირება

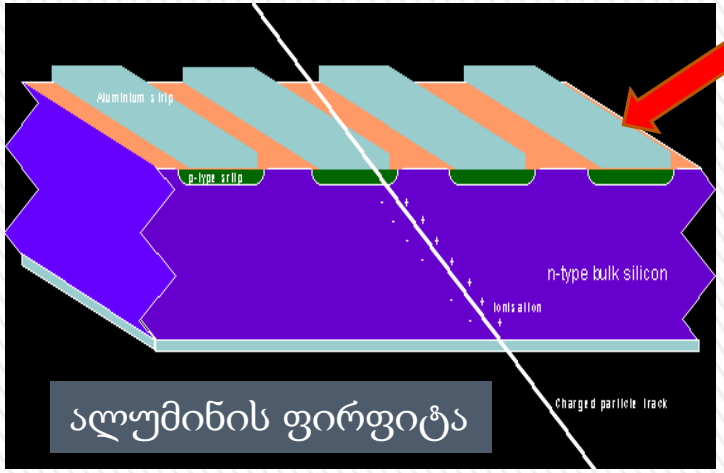


სილიკონის ატომს გარეთა შრეზე გააჩნია ოთხი ელექტრონი და ქმნის კრისტალურ სტრუქტურას

სილიკონის ერთი ატომი ჩანცვლებულია ფოსფორის ატომით, რომელსაც გარეთა შრეზე აქვს ხუთი ელექტრონი. მეხუთე ელექტრონი კრისტალური სტრუქტურის შემქნაში არ იღებს მონაწილეობას და მისი მოცილება ადვილია. ეგრეთ წოდებული **N-ტიპის** სილიკონი

სილიკონის ერთი ატომი ჩანცვლებულია ბორის ატომით, რომელსაც გარეთა შრეზე აქვს სამი ელექტრონი. კრისტალურ სტრუქტურას აკლია ერთი ელექტრონი ეგრეთ წოდებული **P-ტიპის** სილიკონი

ცალმხრივი და ორმხრივი სილიკონური დეტექტორი

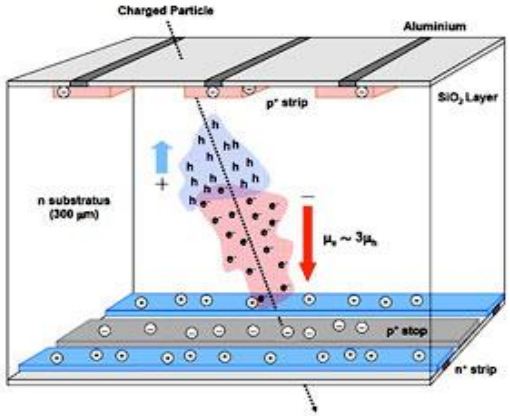


სილიკონში ნაწილაკის გავლის დროს წარმოქმნილი ხვრელები მიემართებიან უარყოფითად დამუხტულ P - ტიპის სტრიპებისკენ, ელექტრონები კი დადებითად დამუხტული ალუმინის ფირფიტისაკენ

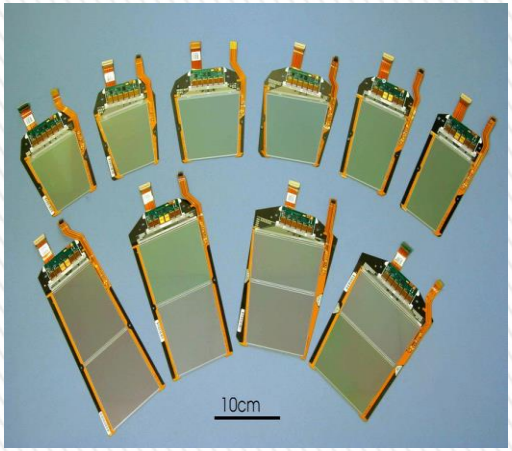
N - ტიპის სილიკონში დატანებულია P - ტიპის ზოლები - სტრიპები, რომლებიც დაფარულია თხელი ალუმინით. ალუმინის ზოლები შეერთებულია მგრძნობიარე ელექტრონიკასთან.

სილიკონის სტრიპების ტიპიური სისქე - 200 - 300 მიკრონი, სტრიპები ერთმანეთისგან მოშორებულია 50 - 100 მიკრონით

ალუმინის ფირფიტის ნაცვლად თუ მოვათავსებთ დადებითი პოტენციალის P - ტიპის სტრიპებს, მაშინ მივიღებთ ორმხრივ დეტექტორს. სტრიპების ორთოგონალური განლაგების შემთხვევაში X და Y კოორდინათის განსაღვრის საშუალება გვექნება

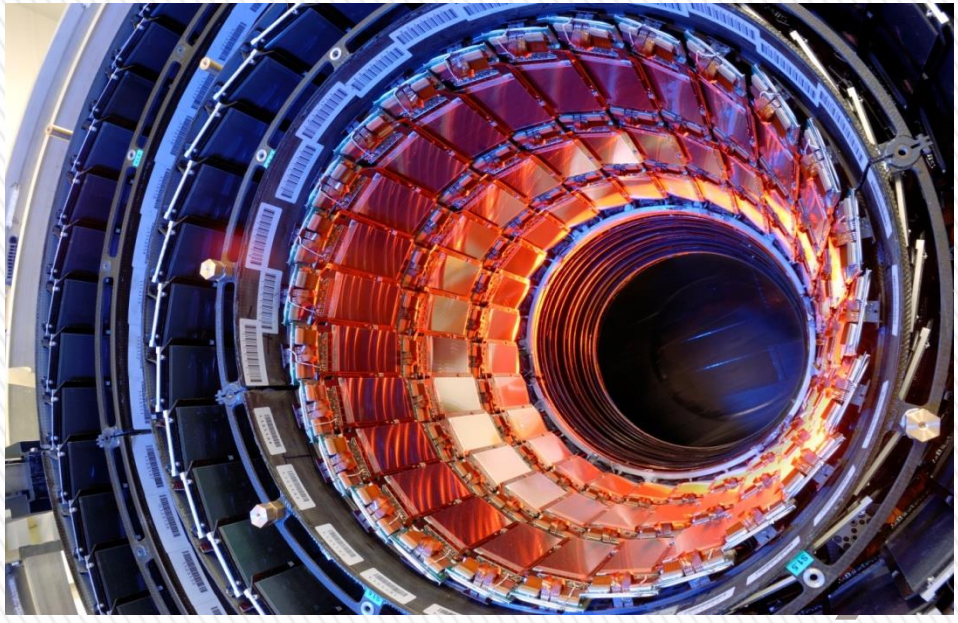


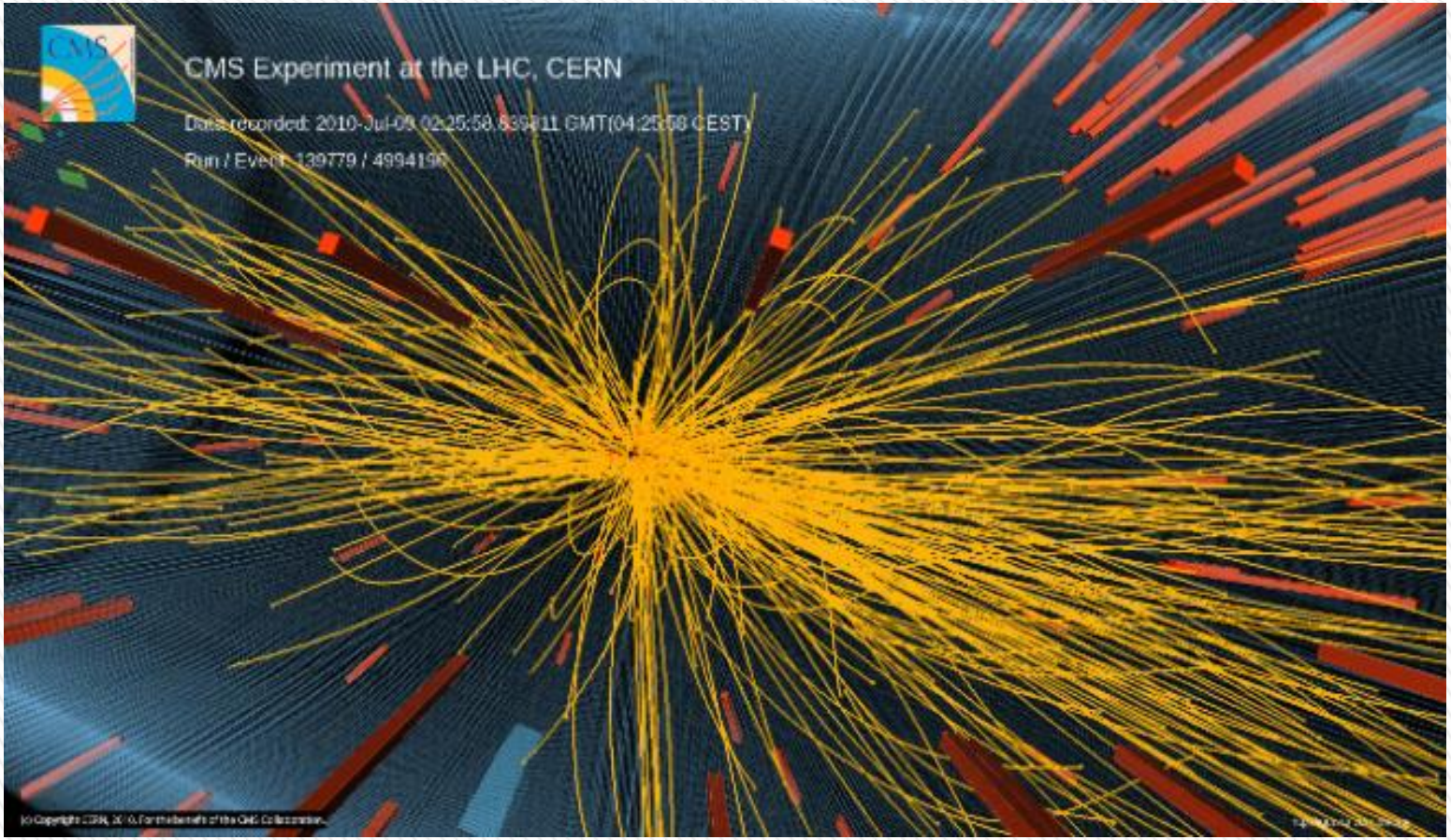
სილიკონური დეტექტორები



სილიკონურ - სტრიპული დეტექტორები შედგენილია ცალკეული მოდულებისგან

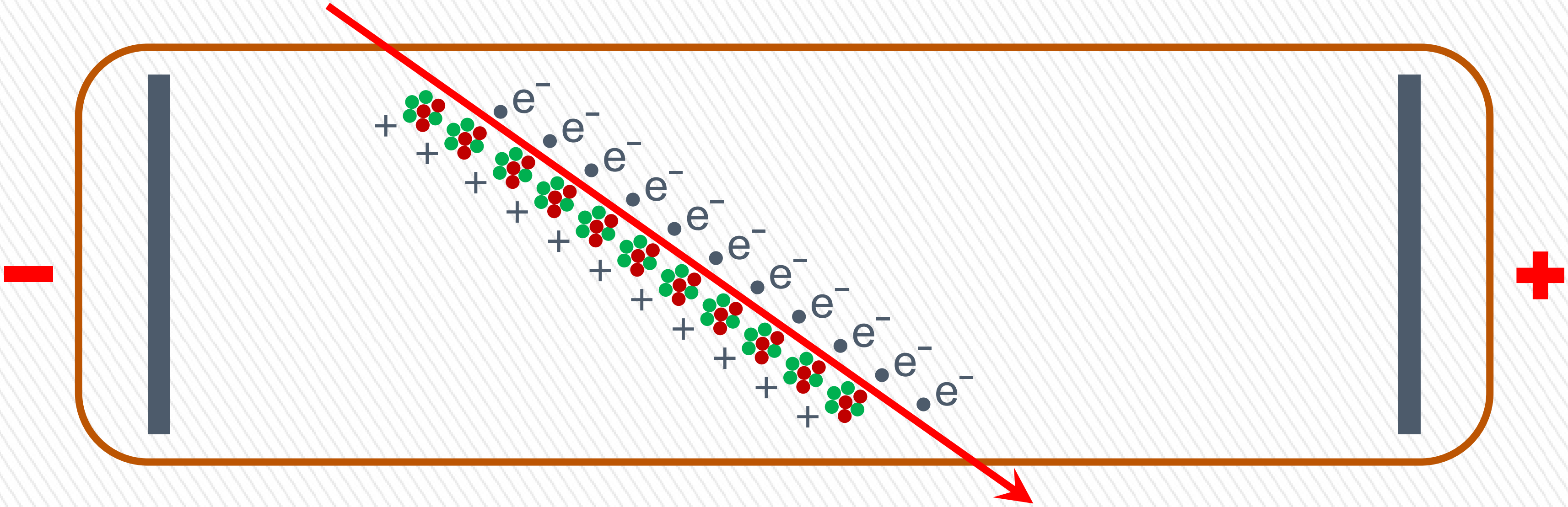
CMS - ექსპერიმენტის სილიკონურ - სტრიპული დეტექტორი, შეიცავს მიახლოებით 9.5 მილიონ სტრიპს





CMS ექსპერიმენტის ერთ ერთი რეალური შემთხვევის კომპიუტერული ვიზუალიზაცია

გაზური დეტექტორები



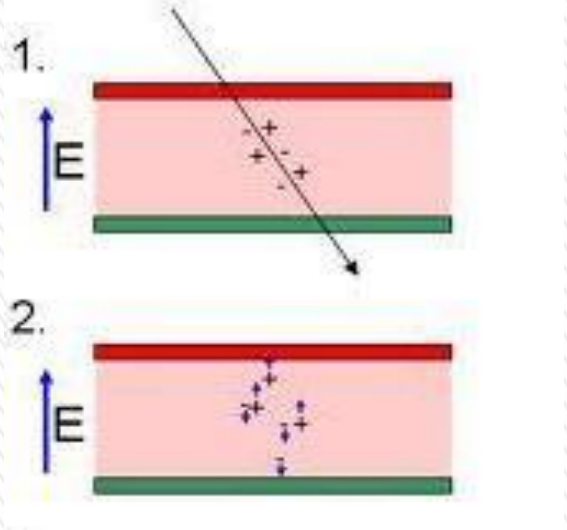
კოორდინატის განსაზღვრა

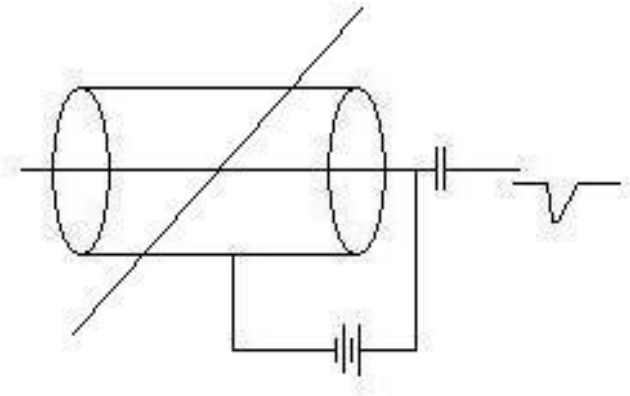
ტრეკული დეტექტორების მუშაობის პრიციპი დაფუძნებულია დამუხტული ნაწილაკის თვისებაზე, მოახდინოს ნივთიერების იონიზაცია, რომელსაც გასჭოლავს.

ძირითადი მოთხოვნები ტრეკული დეტექტორებისთვის

- კარგი სივრცული გარჩევის უნარიანობა
- მინიმალური ენერგეტიკული დანაკარგები
- დაბალი იონიზაციური ენერგია

თუ ნივთიერება, რომლის იონიზაცია მოხდა, მოთავსებულია ელექტრულ ველში, წარმოქმნილი დადებითად დამუხტული იონი და ელექტრონი აჩქარდება და იწყებს მოძრაობას ელექტრული ვალის დაძაბულობის წირების გასწვრივ

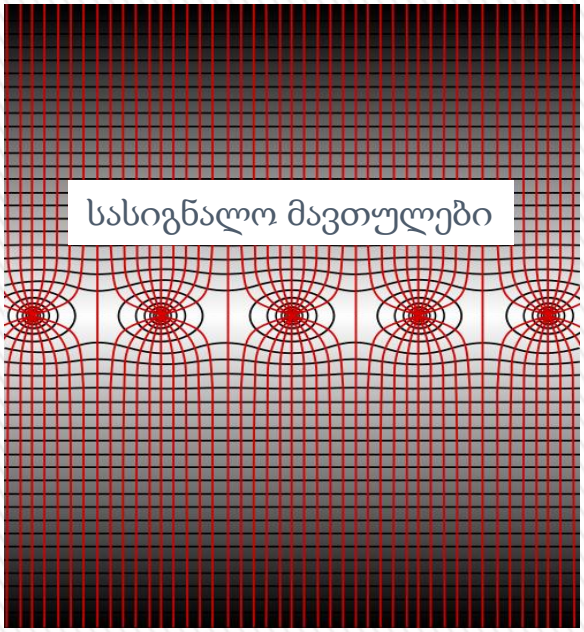




რადიალური ველი, ელექტრონები მოძრაობენ დადებითი პოტენციალის მქონე მავთულისკენ

გაზური ტრეკული დეტექტორების მოქმედების პრინციპი

პოტენციური სიბრტყე



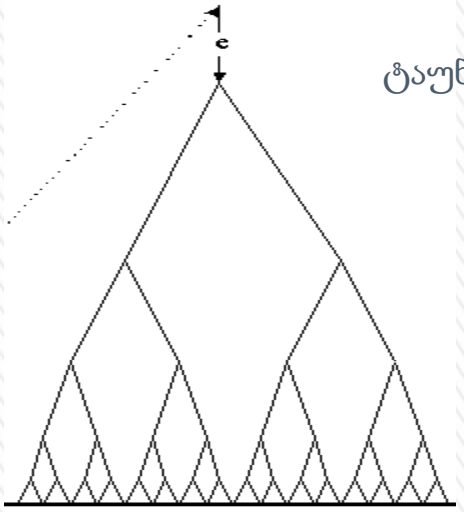
პოტენციური სიბრტყე

სასიგნალო მავთულების დიამეტრი
100, 50 ან 20 მიკრონი

მაღალი ძაბვის სიდიდეზე დამოკიდებულებით
რამდენიმე რეგიონი არსებობს

- რეკომბნაციის რეგიონი
- იონიზაციის რეგიონი
- პროპოციული რეგიონი
- გეიგერ - მიულერის რეგიონი
- გარღვევის რეგიონი

იონიზაციის ადგილი

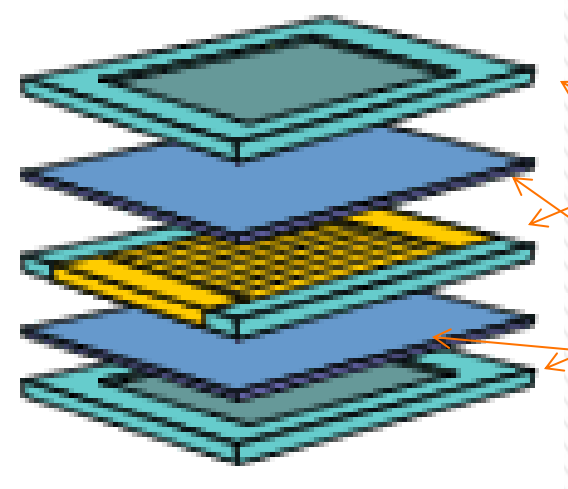


ანოდი

ტაუნსენდის ზვავი - გაზური გაძლიერება

გაზური გაძლიერების კოეფიციენტი
პროპორციულია მოდებული ძაბვის

მრავალ მავთულოვანი პროპორციული კამერა



ანოდური ანუ სასიგნალო სიბრტყე

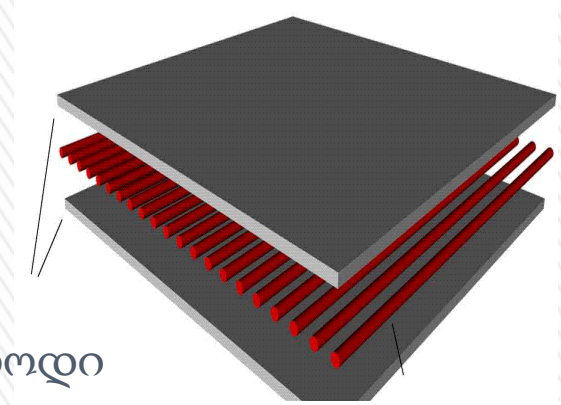
გარე კედლები

კათოდური ანუ პოტენციური სიბრტყეები

კოორდინატის აღდგენის სიზუსტე
დამოკიდებულია ბიჯის სიგანეზე

პირველად შექმნილი იქნა ცერნში ჯორჯ შარპაკისა და მისი ჯგუფის მიერ. ძალიან სწრაფად გახდა პოპულარული და 1992 წელს ჯორჯ შარპაკს ნობელის პრემია მიენიჭა

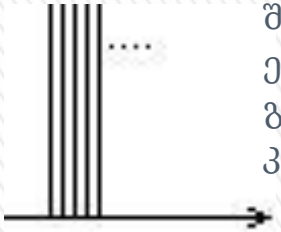
კოორდინატის განსაზღვრა და ტრეკის აღდგენა



კათოდი

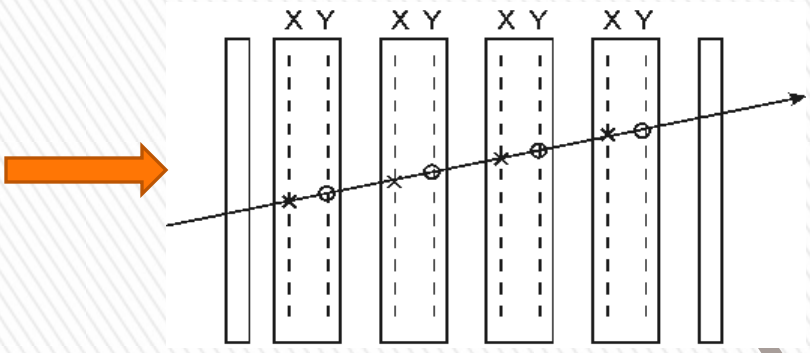
ანოდური მავთულები

თუ ბევრ მავთულებს განვალაგებთ ერთმანეთის პარალელურად გარკვეული ბიჯით მაშინ შეგვეძელება უფრო ზუსტად აღვადგინოთ კოორდინატი



მავთულების ასეთი კოფიგურაციით შესაძლებელია კოორდინათის განსაღვრა ერთი ღერძის გასწვრივ. ვერტიკალურად განლაგებული მავთულები ზომავენ X კოორდინატას

ორი ამდაგვარი სიბრტყის განლაგება ერთმანეთის მიყოლებით, როდესაც ერთი სიბრტყე 90 გრადუსითაა მოტრიალებული მეორის მიმართ გვაძლევს საშუალებას აღვადგინოთ წერტილი. თუ ერთმანეთის მიყოლებით განვალაგებთ მრავალ სიბრტყეს, მაშინ აღვადგენთ წერტილებს ნაწილაკის ტრაექტორიის გასწვრივ და შესამისად დავაფიქსირებთ ნაწილაკის **ტრეკს**



იონიზაციური გარემო და ველის კონფიგურაცია

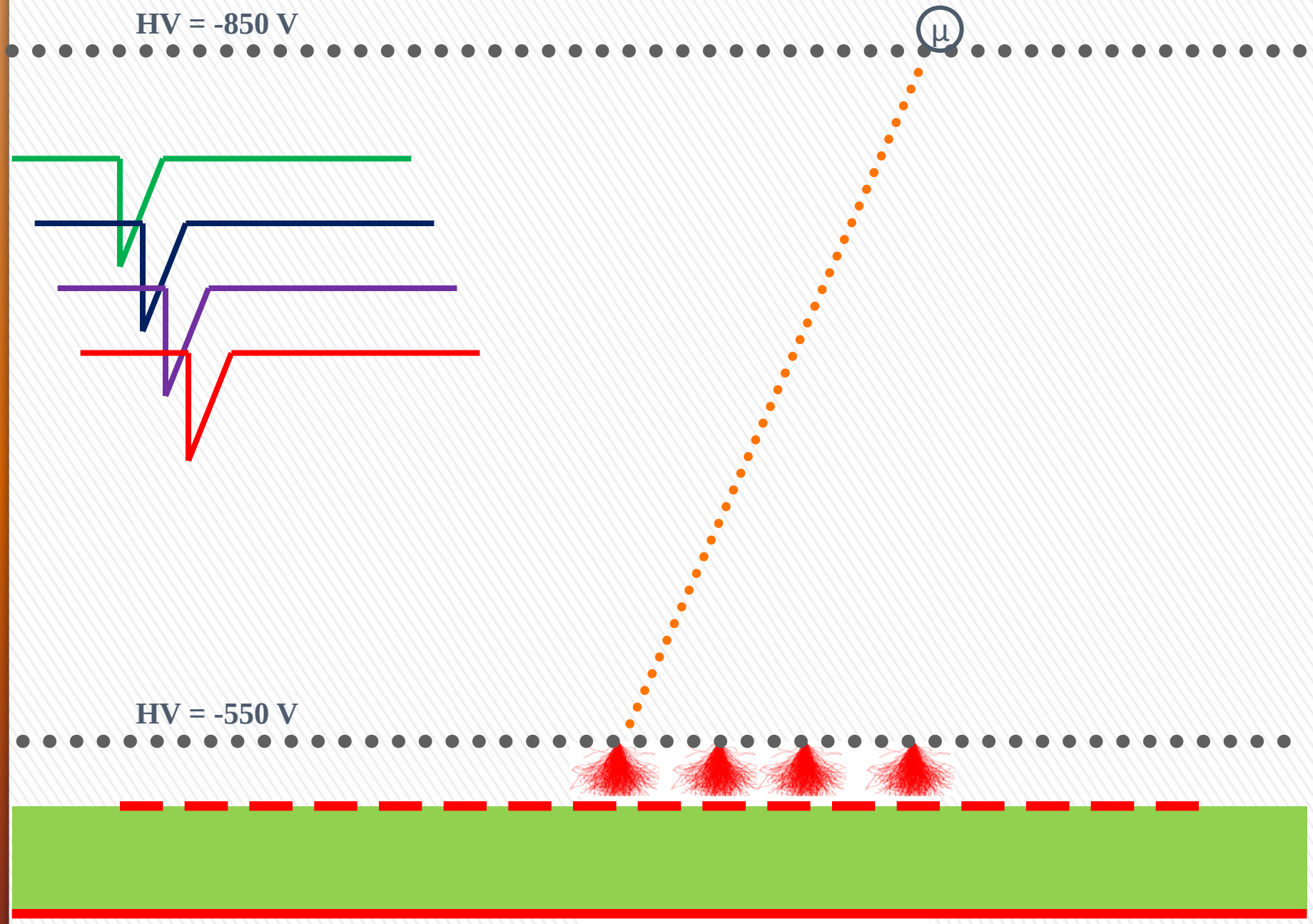
- მინიმალური ენერგეტიკული დანაკარგები
- დაბალი იონიზაციური ენერგია
- დაბალი ქიმიური აქტივობა

} → ინერტული გაზები

He,Ne,**Ar**,Kr,Xe

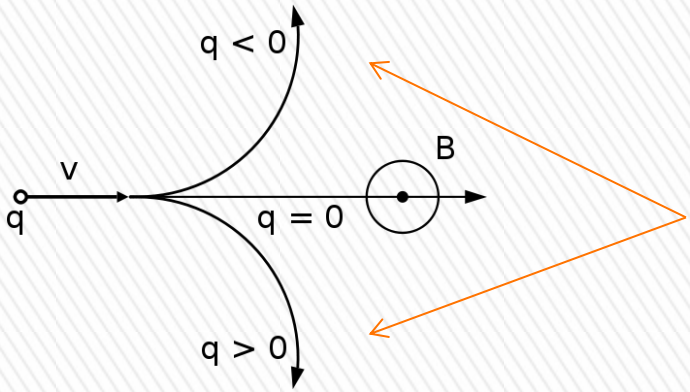
რაც უფრო მეტი ელექტრონული შრე აქვს გაზის ატომს, მით უფრო მცირეა ელექტრონების ბმის ენერგია გარეთა შრეზე. გაზის ატომური რიცხვი უნდა იყოს შეძლებისდაგვარად მაღალი.

He - არცთუ კარგია ერთი შრე, მხოლოდ ორი ელექტრონი
Ne - ორი შრე, რვა ელექტრონი გარეთა შრეზე
Ar - სამი შრე, ასევე რვა ელექტრონი გარეთა შრეზე
Kr და Xe - საკმაოდ ძვირი გაზებია, თუმცა ექსპერიმენტული ამოცანიდან გამომდინარე გამოიყენება


HV = -850 V
μ
HV = -550 V

დამუხტული ელემენტარული ნაწილაკების მუხტის განსაზღვრა

მოქმედებს ლორენცის ძალა $\vec{F} = q.[\vec{v}\,\vec{B}]$



რადგან მაგნიტური ველის მიმართულება ცნობილია, იმის და მიხედვით თუ საით გადაიხრება დამუხტული ნაწილაკი, განისაღვრება მისი მუხტი

დამუხტული ელემენტარული ნაწილაკების იმპულსის განსაღვრა

მოქმედებს ლორენცის ძალა $\vec{F} = q.[\vec{v}\,\vec{B}]$ და მოძრაობს წრეწირზე, ამიტომ ჩვენ შეგვიძლია რომ ჩავწეროთ

$$\frac{mv^2}{R} = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha$$

ან, რაც იგივეა

$$p = R \cdot q \cdot B \cdot \sin\alpha$$

R	ტრაექტორიის სიმრუდის რადიუსი
α	კუთხე ტრაექტორიის მხებსა და მაგნიტური ველის მიმართულებას შორის
q	მუხტი
B	მაგნიტური ველის დაძაბულობის მოდული

იმპულსის განსაღვრის ძირითადი მეთოდი.

ამ მეთოდის მთავარი იდეა მდგომარეობს დამუხტული ნაწილაკის ტრაექტორიის ან გდახრის კუთხის დაფიქსირებაში

გმადლობთ ყურადღებისათვის