

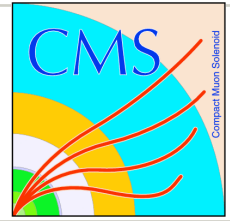
ელემენტარული ნაწილაკების დეტექტირება

ქეთი ქააძე, ალექს მესტვირიშვილი

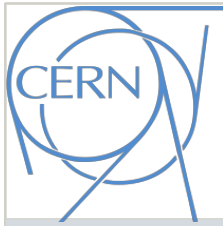




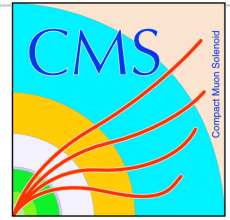
შინაარსი



- ნაწილაკების კლასიფიკაცია
- ელემენტარული ნაწილაკების დეტექტირება
- ნაწილაკების იდენტიფიკაცია
- არასტაბილური ნაწილაკების დეტექტირება
- მონაცემთა ანალიზი



ნაწილაკთა კლასიფიკაცია



- მაღალი ენერგიების ნაწილაკთა ფიზიკა შეისწავლის სამყაროს უმცირეს შემადგენელ ნაწილებს

- ელემენტარული

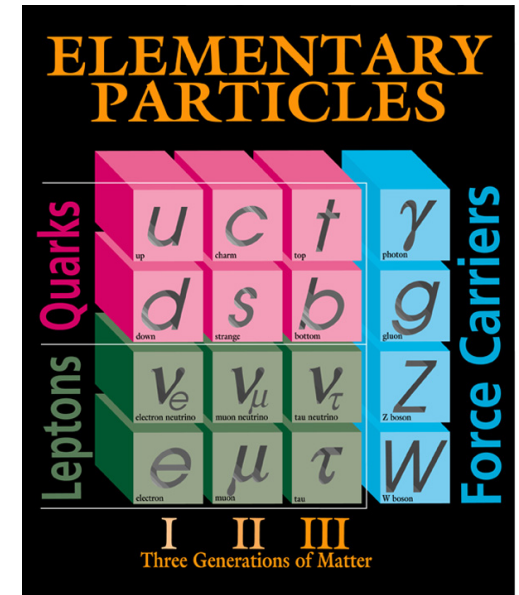
- ლეპტონები და კვარკები -- ფერმიონები
- ურთიერთქმედების გადამტანი ბოზონები

- შედგენილი ნაწილაკები

- ადრონები, რომლებიც აერთიანებს მეზონებს, ბარიონებს, ჰიპერონებს და ა.შ.

- დეტექტირებისთვის საჭირო მახასიათებლები

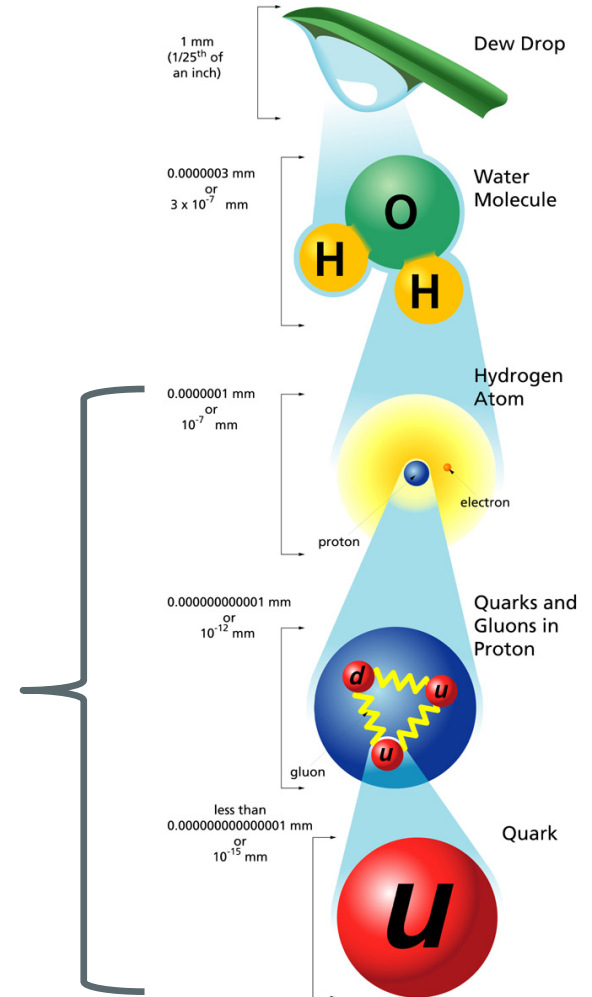
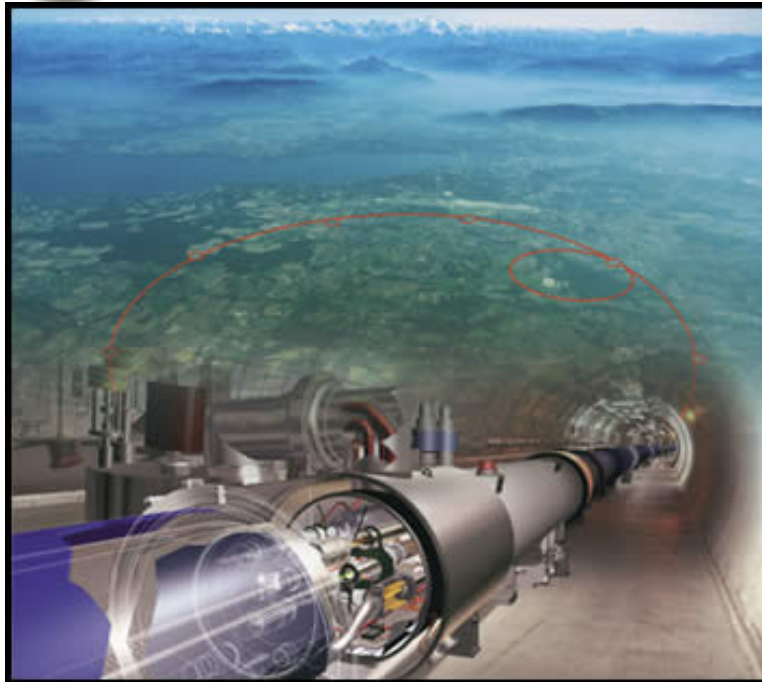
- ელექტრულად დამუხტული ($e^\pm, p, \pi^\pm \dots$) ან ნეიტრალური - ($n, \gamma \dots$)
- სტაბილური ($e^\pm, \pi^\pm, n \dots$) ან იშლებიან სტაბილურ ნაწილაკებათ ($\pi^0, K^0 \dots$). სტაბილურობა განისაზღვრება მათი სიცოხლის ხანგრძლივობით $n - 887\text{წ}$, $\mu - 2.2 \times 10^{-6}\text{წ}$.
- ელექტრომაგნიტურ (e^\pm, γ) თუ ძლიერ ურთიერთქმედებაში მონაწილე (p, n, π^\pm)

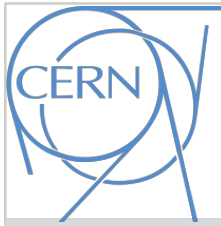


მიკროსკოპები

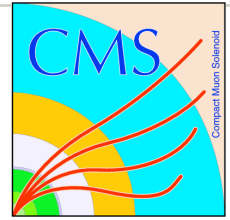


Hans Lippershey,
1600 AD





ნაწილაკების დეტექტირების პრინციპები



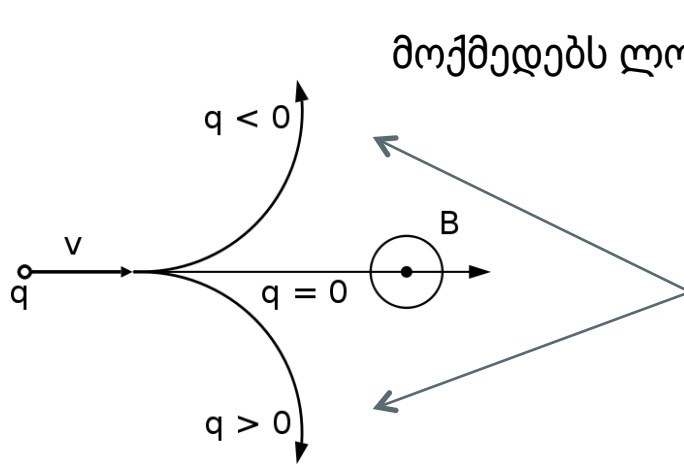
ნაწილაკების დეტექტირებას საფუძვლად უდევს მათი უნარი იურთიერთქმედონ ნივთიერებასთან. ძირითადად ნაწილაკთა რეგისტრირება ხდება ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების შედეგად

- ❖ იონიზაცია
- ❖ ფოტოეფექტი
- ❖ წყვილთა წარმოქმნა
- ❖ ჩერენკოვის გამოსხივება
- ❖ ბრემსშტრალუნგი - დამუხტული ნაწილაკის მიერ გამოსხივება ელექტრულ ველში გაბნევის დროს

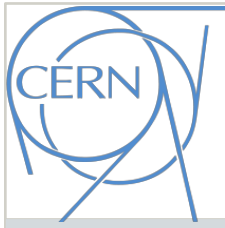
ადრონული ურთიერთქმედება აგრეთვე გამოიყენება ძლიერად ურთიერთქმედი ნაწილაკთა რეგისტრაციისთვის - კერძოდ ადრონულ კალორიმეტრებში

- იმპულსის და მუხტის განსაზღვრის მეთოდი დაფუძნებულია დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობაზე მაგნიტურ ველში
 - მაგნიტი მნიშვნელოვანი კომპონენტია დეტექტორებში

მუხტის განსაზღვრა



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



იმპულსის და მუხტის განსაზღვრა

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

$$\frac{mv^2}{R} = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad \text{ან, რაც იგივეა}$$

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

R ტრანსპორტის სიგრძის რადიუსი
 α კუთხე ტრანსპორტის მხებსა და მაგნიტური ველის მიმართულებას შორის

q მუხტი
 B მაგნიტური ველის დაძაბულობის მოდული

იმპულსის განსაზღვრა

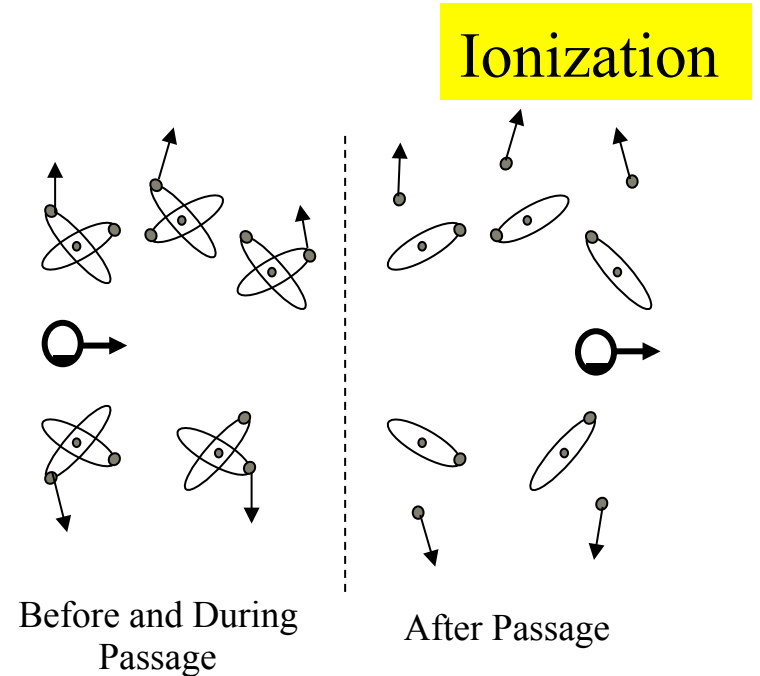
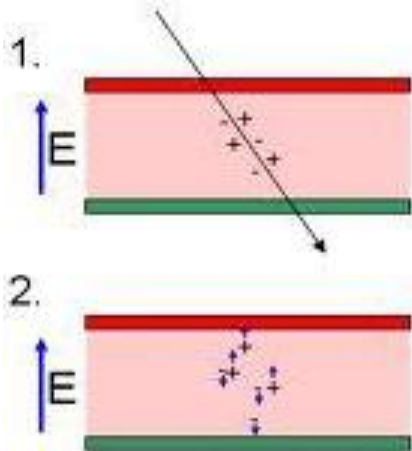
ამ მეთოდის მთავარი იდეა მდგომარეობს დამუხტული ნაწილაკის ტრანსპორტის ან გადახრის კუთხის დაფიქსირებაში

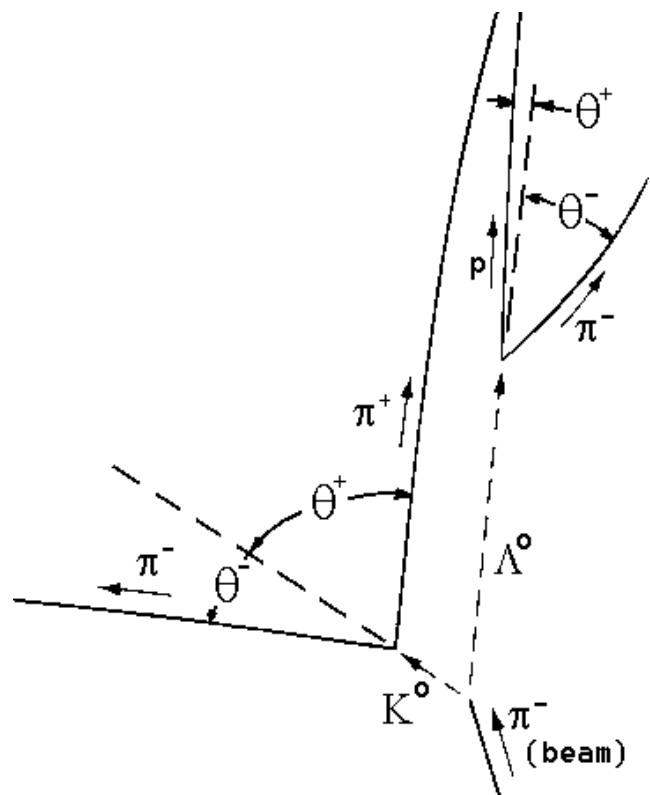
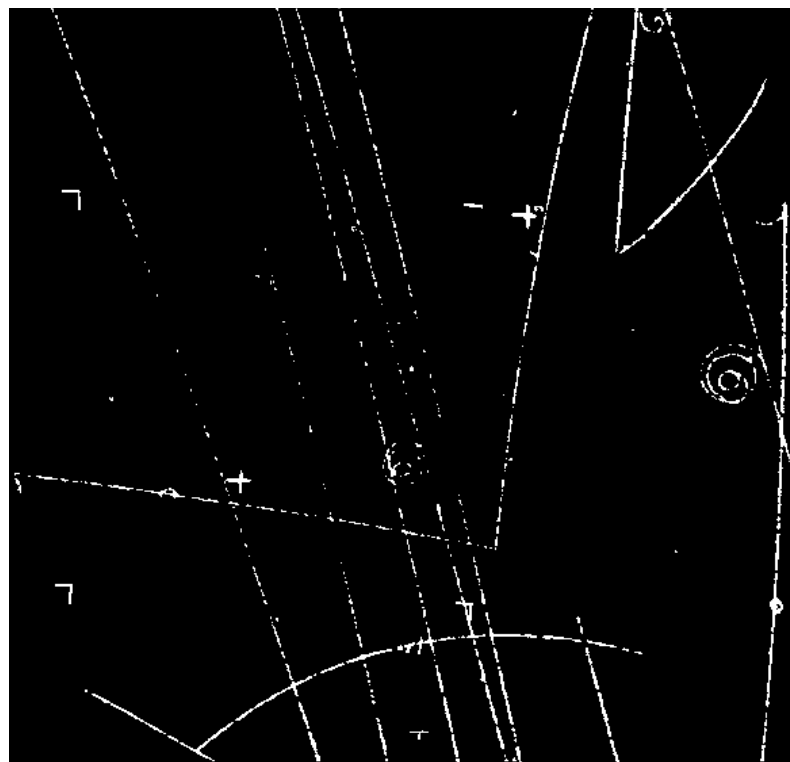
ტრეკული დეტექტორების -- დამუხტული ნაწილაკის თვისებაზე ახდენს ნივთიერების იონიზაციას

ძირითადი მოთხოვნები ტრეკული დეტექტორებისთვის

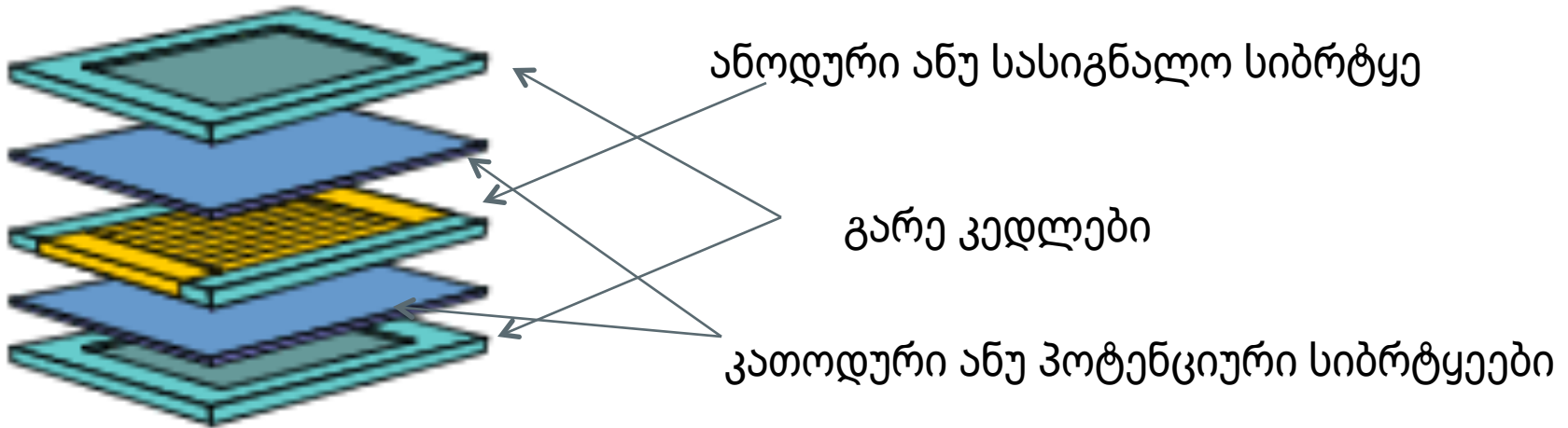
- ❖ კარგი სივრცული გარჩევის უნარიანობა
- ❖ მინიმალური ენერგეტიკული დანაკარგები
- ❖ დაბალი იონიზაციური ენერგია

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





მრავალ მავთულოვანი პროპორციული კამერა



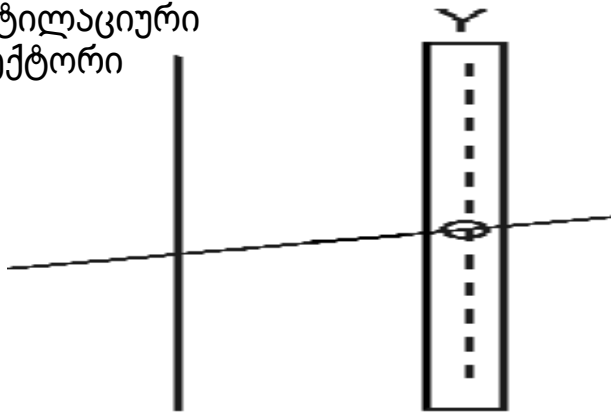
კოორდინატის აღდგენის სიზუსტე
დამოკიდებულია ბიჯის სიგანეზე

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

დრეიფული კამერა

დრეიფული კამერა პროპორციული კამერის ნაირსახეობაა - მოქმედების პრინციპი და მექანიკური მოწყობილობა ერთი და იგივეა, იმ მცირე განსხვავებით, რომ დრეიფულ კამერაში ვზომავთ არა მარტო იონიზაციით გამოწვეულ სიგნალს, არამედ გაზის იონიზაციის შედეგად წარმოქმნილი ელექტრონების დრეიფის დროს სასიგნალო მავთულამდე

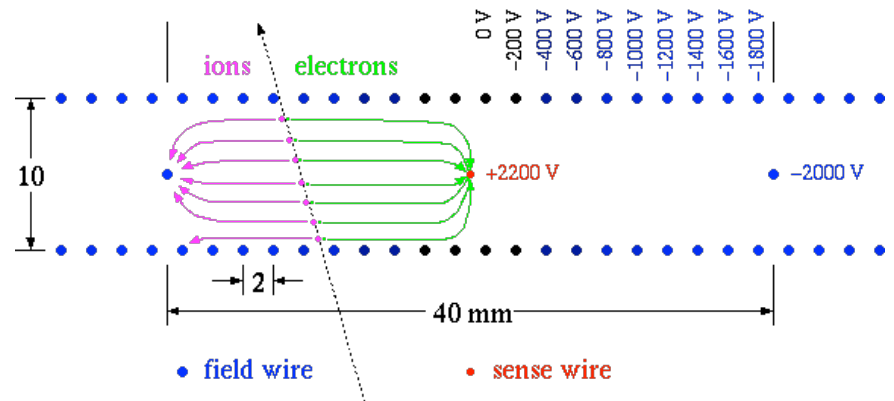
სცინტილაციური
დეტექტორი



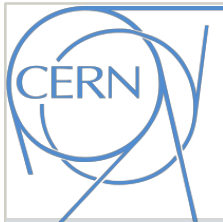
დრეიფული კამერა

ელექტრონების საშუალო დრეიფის
სიჩქარე მოცემულ გაზში
ცნობილია

სცინტილაციური დეტექტორი იძლევა საწყის დროს - t_0 , ასევე ვზომავთ ანოდური მავთულიდან სიგნალის მოსვლის დროს - t_1



ამ მეთოდის გამოყენება საშუალებას იძლევა გავზარდოთ კოორდინატის განსზღვრის სიზუსტე. თუ პროპორციულ კამერაში კოორდინატის აღდგენის სიზუსტე ძირითადად არის ბიჯის ნახევრის ტოლი (1 მმ ბიჯის დროს სიზუსტე 500 მიკრონია). დრეიფულ კამერებში კოორდინატის აღდგენის სიზუსტე არის 100 ან 50 მიკრონის რიგის.



სილიკონური დეტექტორები



დიდ ენერგიებზე ურთირთქმედებისას მეორადი ნაწილაკების რიცხვი გაცილებით დიდია და გაზური დეტექტორები უკვე ვეღარ უზრუნველყოფენ კოორდინატის აღდგენის სიზუსტეს.

ნ ა ხ ე ვ ა რ გ ა მ ტ ა რ უ ლ ი მ ი კ რ ო ელექტრონიკის განვითარებამ მოგვცა ახალი ტიპის - სილიკონური დეტექტორების შექმნის საშუალება

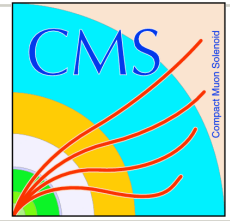
მოქმედების პრინციპი აგრეთვე დაფუძნებულია იონიზაციაზე - სილიკონის იონიზაცია

სილიკონური დეტექტორის მოქმედების პრინციპით ძან ჩამოკვავს იონიზაციური კამერის მოქმედების პრინციპს - არა გვაქვს მეორადი იონიზაცია

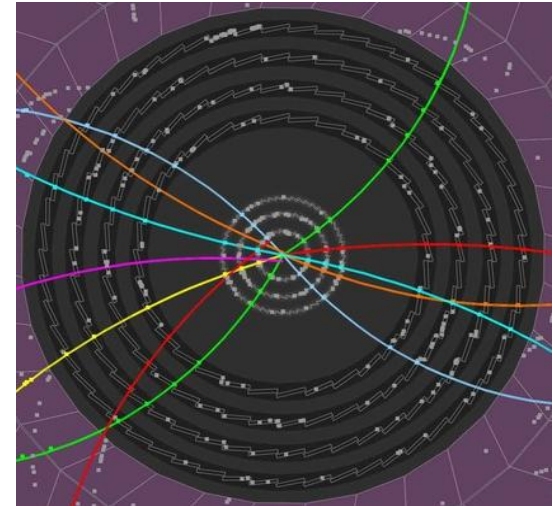
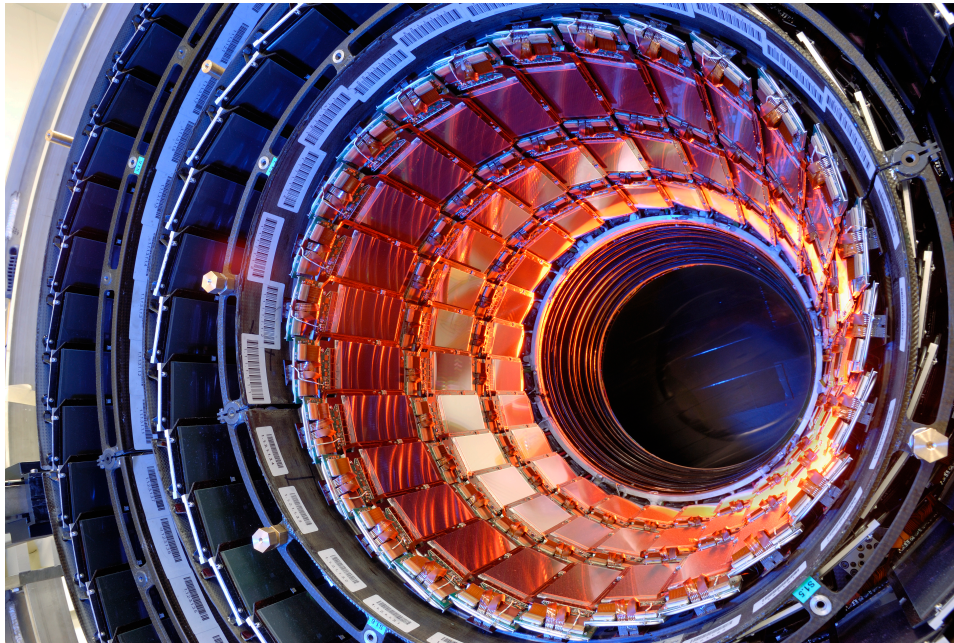
სილიკონი დიელექტრიკია და გააჩნია კრისტალური სტრუქტურა, კრისტალური სტრუქტურის იონიზაცია საკმაოდ ძნელია - გამოიყენება ლეგირების პროცესი



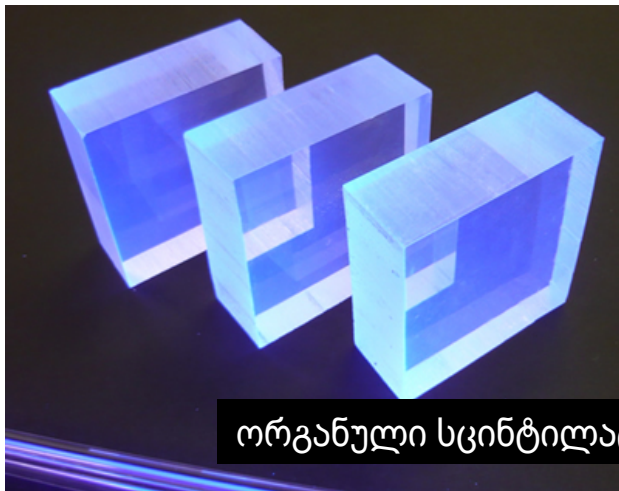
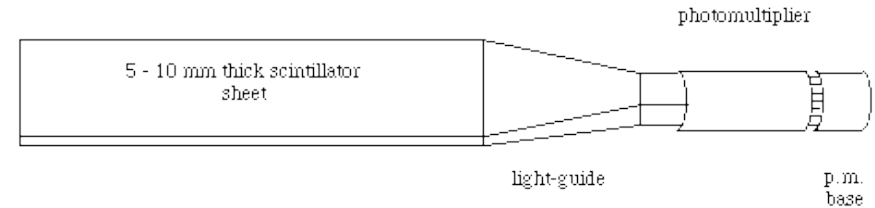
სილიკონური დეტექტორები



CMS - (Compact Muon Solenoid - მუონების კომპაქტური სოლენოიდი) ექსპერიმენტის სილიკონურ - სტრიპული დეტექტორი, შეიცავს მიახლოებით 9.5 მილიონ სტრიპს



ზოგიერთი სახის ნივთიერებაში, როდესაც დამუხტული ნაწილაკი კვეთს მას, ატომები გადადიან აგლზნებულ მდგომარეობაში, ელექტრონები იცვლიან ენერგეტიკულ დონეს უფრო მაღალზე. მცირე დროის მერე, როცა ელექტრონები ბრუნდებიან თავიანთ ენერგეტიკულ დონეებზე, ასხივებენ შუქს. გამოსხივებული შუქი ვრცელდება სცინტილატორის შიგნით მრავაჯერადი არეკვლის მეშვეობით. შუქის ინტენსივობა პროპორციულია გადამკვეთი ნაწილაკის ენერგიის.

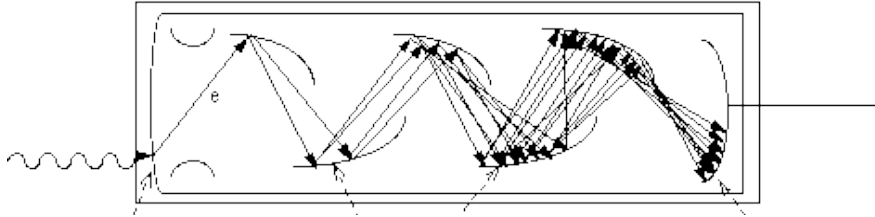


ორგანული სცინტილატორი

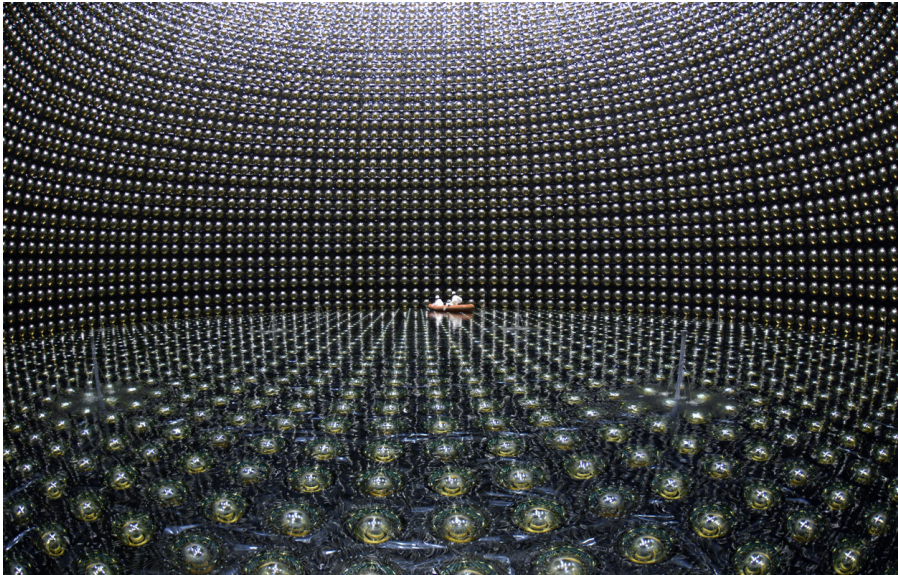


არა ორგანული სცინტილატორი - BGO

photomultiplier



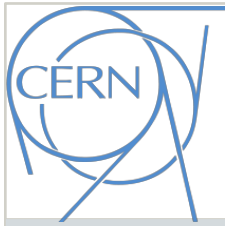
ფოტოკათოდი დინოდები ანოდი



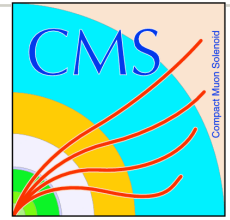
- ❖ წრფივი დეტექტორი - დენი გამოსავალზე დაცემული სინათლის ინტენსივობის წრფივი ფუნქციაა.
- ❖ გამრავლების კოეფიციენტი - ანოდური დენის შეფარდება კათოდურთან $G = \frac{I_a}{I_c}$
- ❖ სწრაფი დეტექტორია - გამოსავალი იმპულსის სიგანე რამდენიმე ნანო წამის რიგისაა
- ❖ სიგნალის საკმაოდ დიდი ამპლიტუდა მილივოლტების რიგის, ადვილად ფიქსირდება

ფოტოგამამრავლებელი ფართოდ გამოიყენება კალორიმეტრიაში, სადაც ფიქსირდება დამუხტული ნაწილაქების მიერ სცინტილატორებში აღძრული შუქი

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



კალორიმეტრია



- კალორიმეტრია მნიშვნელოვანი დარგია ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკის მეთოდოლოგიაში
 - ნეიტრალური ნაწილაკების ენერგიას კალორიმეტრების გარეშე ვერანაირად ვერ გავზომავთ
 - პირველადი ელემენტარული ნაწილაკების კონის ენერგიის ზრდასთან ერთად იზრდება მეორადი დამუხტული ნაწილაკების ენერგიებიც, შესაბამისად მცირდება იმპულსის განსაზღვრის სიზუსტე.
 - ნაწილაკების ენერგიის ზრდასთან ერთად იზრდება მათი ენერგიის განსაზღვრის სიზუსტე

X_0 - რადიაციული სიგძე - მანძილი რომლის გავლის დროსაც დამუხტული ნაწილაკის ენერგია მცირდება e (ნეპერის რიცხვი)-ჯერ. (ელექტრომაგნიტურად ურთიერთქმედებისთვის)

λ - ურთიერთქმედების სიგრძე ანუ საშუალო თავისუფალი განარბენი - საშუალო მანძილი ორ ერთმანეთის მომდევნო არადრეკად ურთიერთქმედებას შორის (ადრონული ურთიერთქმედებისთვის)

ორი ტიპის კალორიმეტრები არსებობს - ელექტრომაგნიტური და ადრონული.

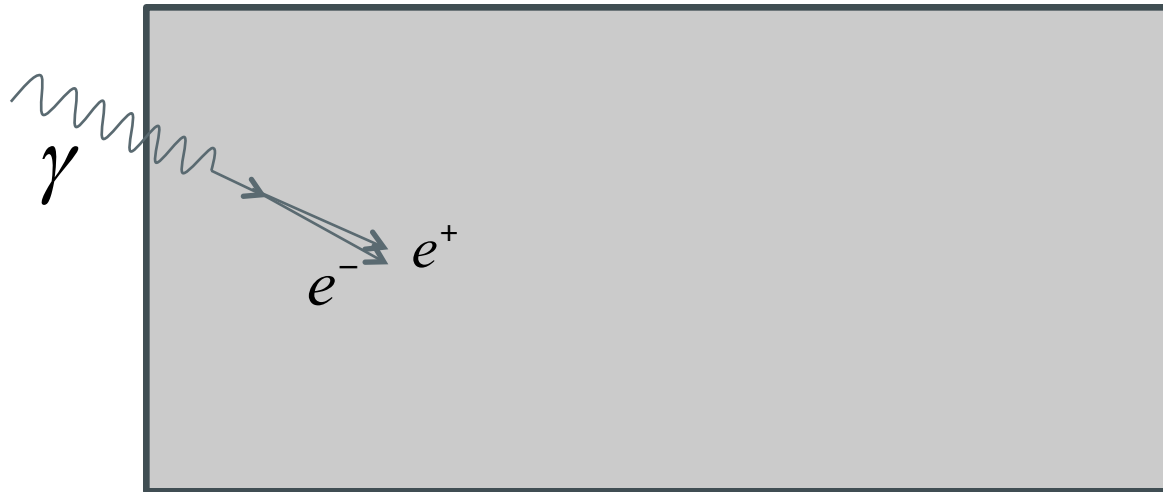
კალორიმეტრები მოწყობილნი არიან შემდეგნაირად

- ❖ მშთანთქმელი - რომელშიც ნაწილაკი განიცდის ურთიერთქმედებას, ვითარდება კასკადური პროცესი - მეორადი ნაწილაკების ღვარი
- ❖ გარემო რომელიც ახდენს მეორადი ურთიერთქმედების შედეგად წარმოქმნილი მუხტის შეგროვებას და გაზომვას

რა პროცესები მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში:

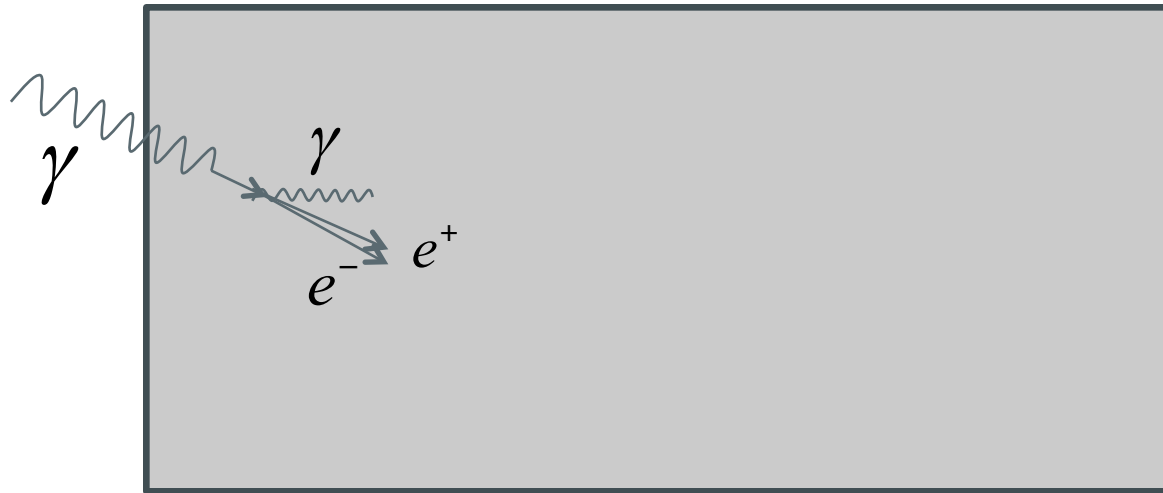
❖ წყვილთა წარმოქმნა - გამა ქვანტები

❖ ბირთვის ელექტრულ ველში გაბნევა - ბრემსშტრალუნგი - ელექტრონები



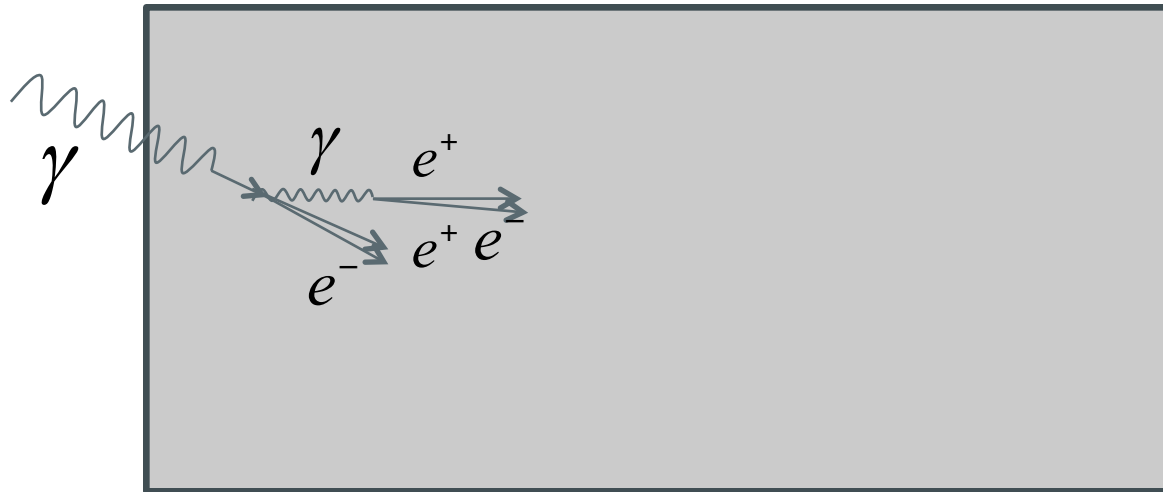
რა პროცესები მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში:

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



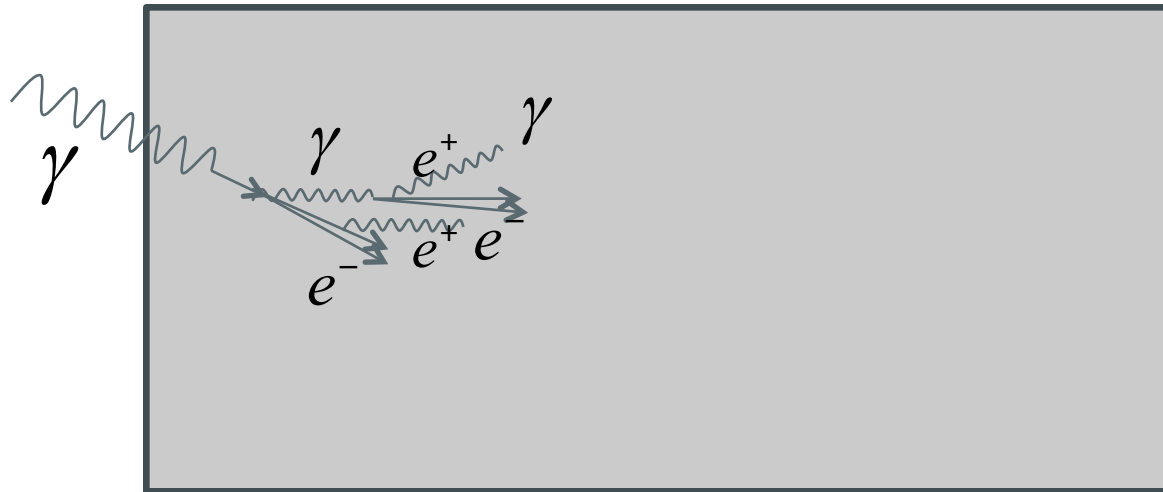
რა პროცესები მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში:

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



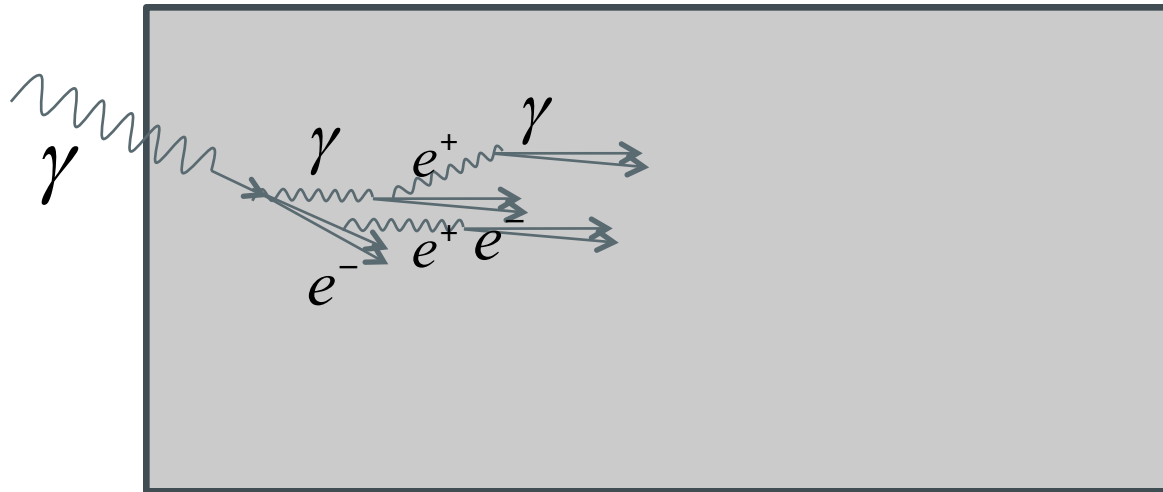
რა პროცესები მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში:

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



რა პროცესები მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში:

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

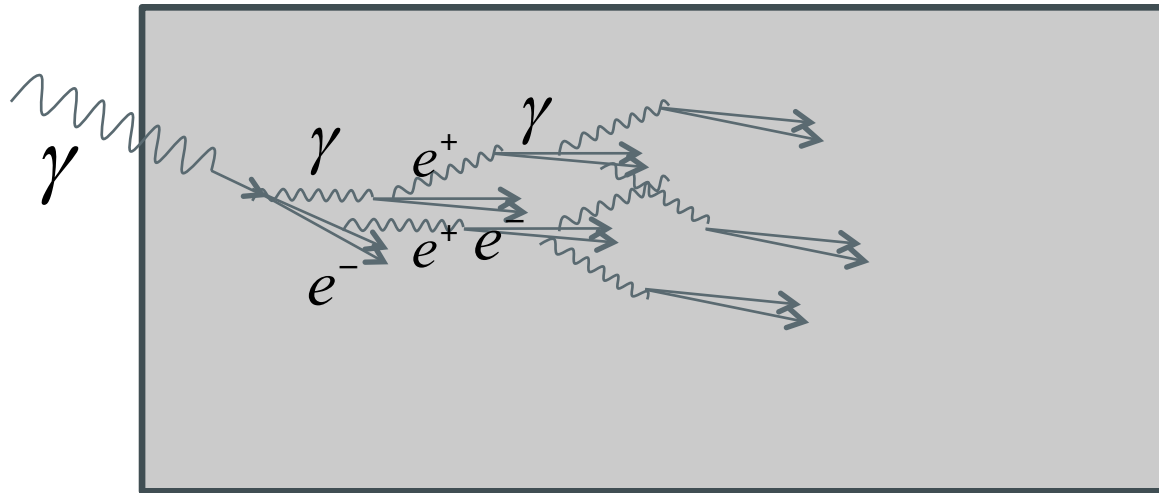


ასე ვითარდება ელექტრომაგნიტური ღვარი

რა პროცესები მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში:

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

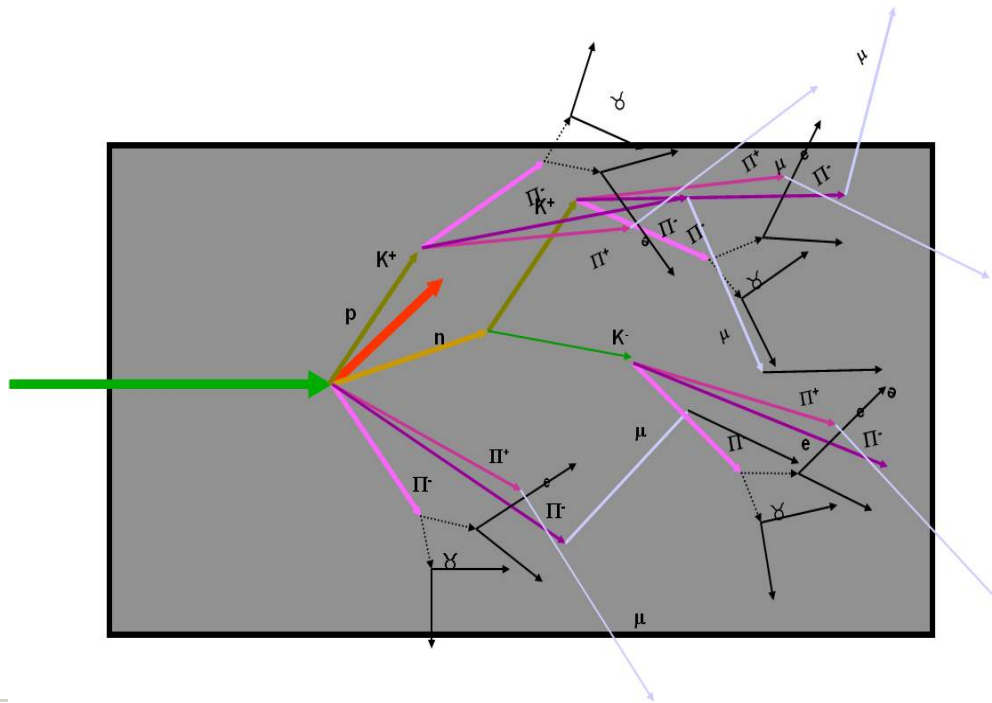
ელექტრომაგნიტურ კალორიმეტრში ელექტრონები და ფოტონები გამოყოფენ ენერგიის 95 დან 100 %



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

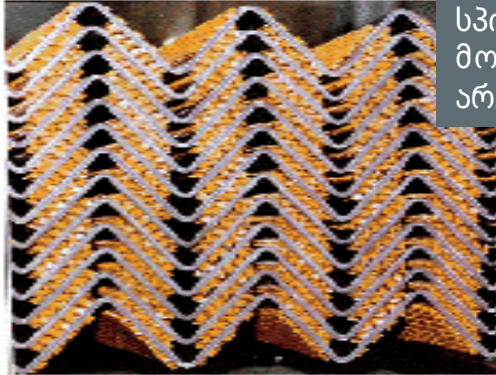
ადრონი ნივთიერებაში მოხვედრისას გაცილებით დიდ მანძილზე შეაღწევს შიგნით, სანამ პირველ ურთიერთქმედებას განიცდის

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

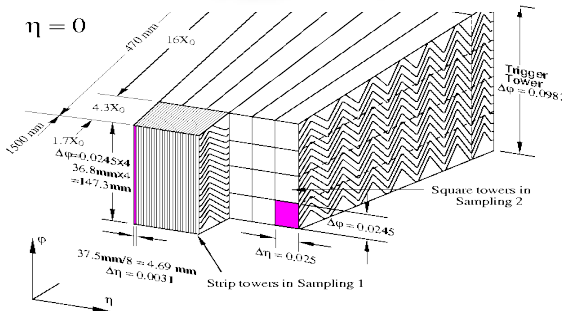
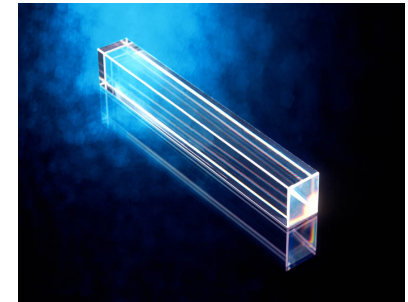
კალორიმეტრია



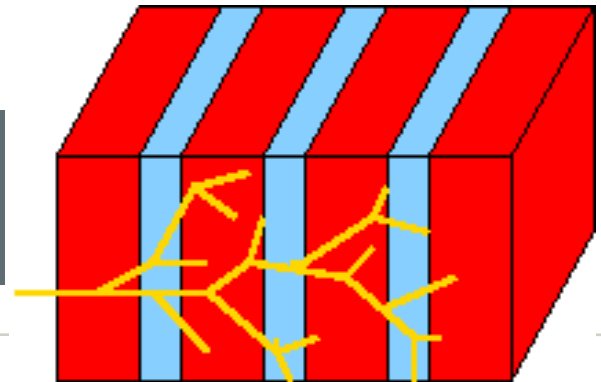
ტყვის მშთანქმელი და სპილენძის ელექტროდები მოთავსებულია თხევად არგონში

ვოლფრამირებული ტყვის კრისტალი $PbWO_4$ - მკვრივია, ასრულებს მშთანქმელის როლს და სცინტილატორია

ექსპერიმენტ CMS - ის წინა ადრონული კალორიმეტრი



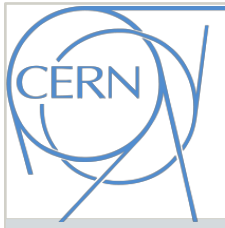
კალორიმეტრი, სადაც მშთანქმელი და აქტიური ნაწილი (სცინტილატორის ფირფიტები) ერთმანეთის მონაცვლეობითაა განლაგებული



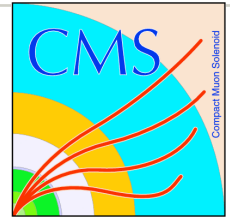
ექსპერიმენტ ATLAS - ის თხევადი არგონის კალორიმეტრი

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

მეორადი ნაწილაკების მიერ ბოჭკოების გადაკვეთისას წარმოიშვება ჩერენკოვის გამოსხივება, რომლსაც ვაფიქსირებთ ფოტო გამამრავლებლებით



მუონური დეტექტორები

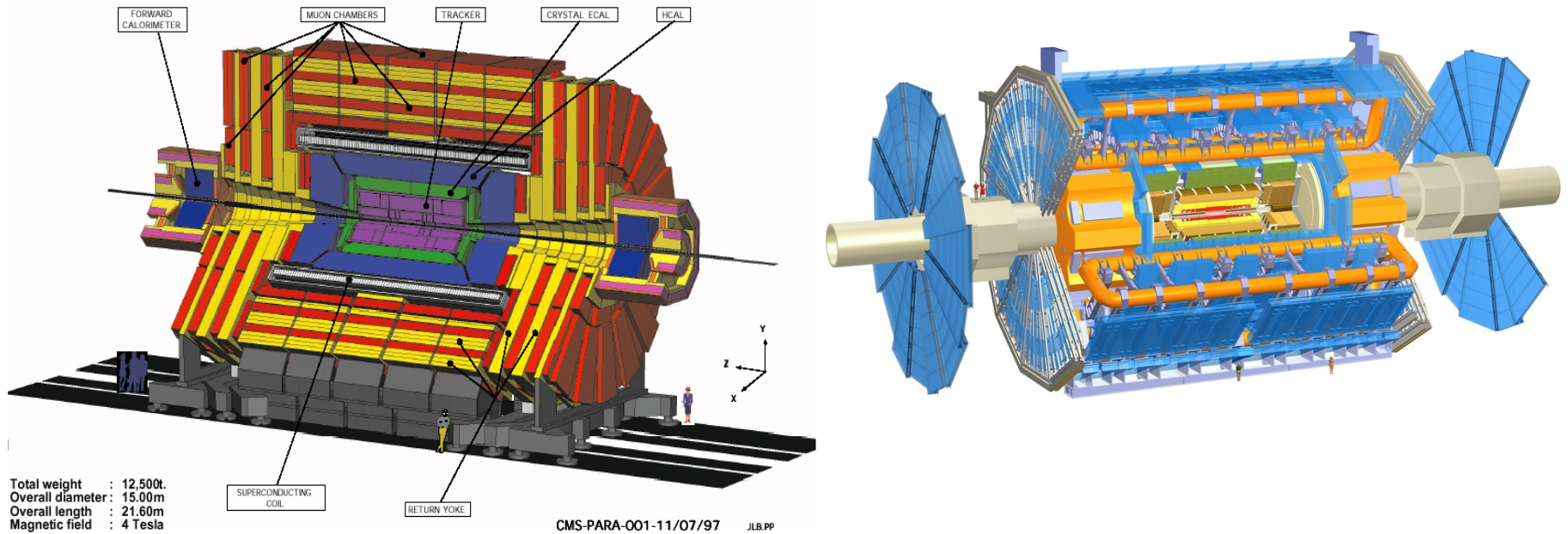


მუონური დეტექტორები იგივე ტრეკული დეტექტორებია და ექსპერიმენტებში, სადაც მას იყენებენ, ძირითადი ტრეკული დეტექტორისგან განსხვავდება მხოლოდ განლაგებით. განპირობებულია მუონის თვისებით გასჭოლოს დიდი რაოდენობის ნივთიერება და არ ან მინიმალურ დონეზე შევიდეს ურთიერთქმედებაში

- ნაწილაკთა ურთიერთქმედება ნივთიერებასთან განსაზღვრავს დეტექტორების აგებულებას

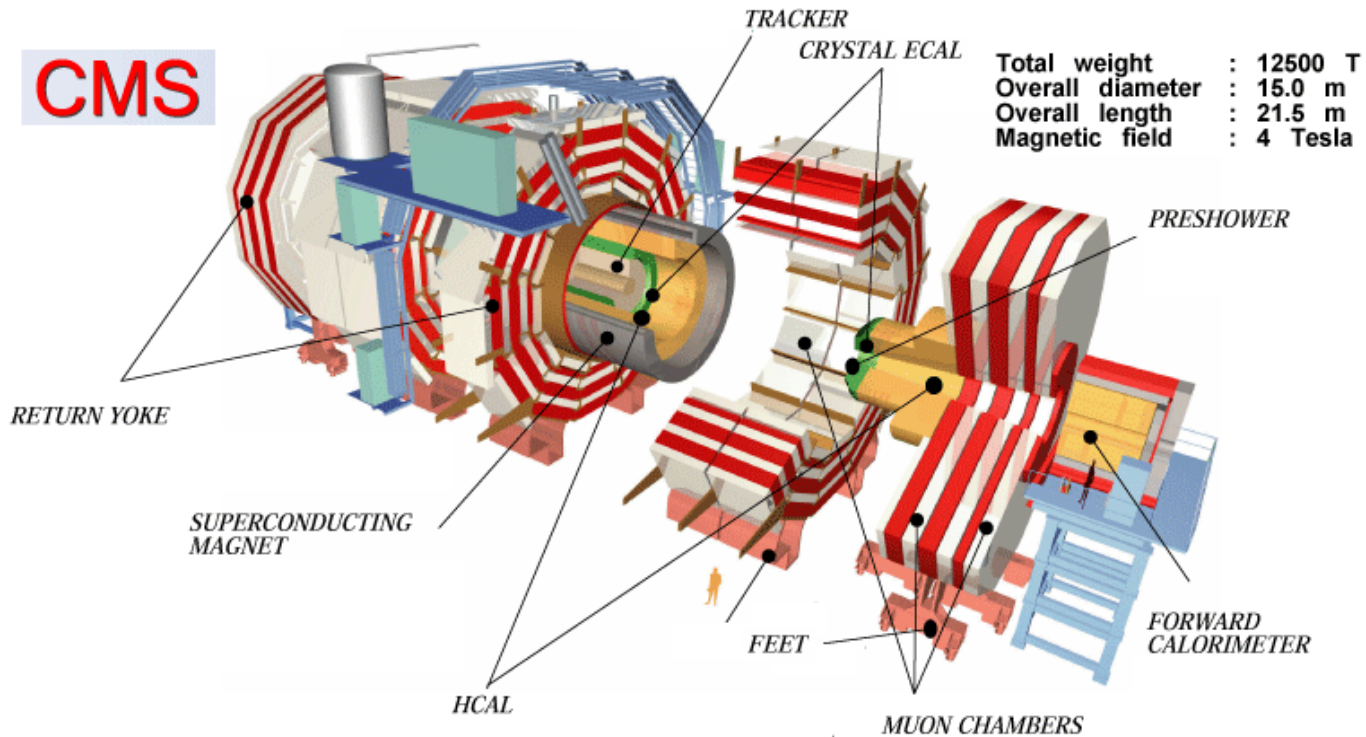
CMS

A Compact Solenoidal Detector for LHC

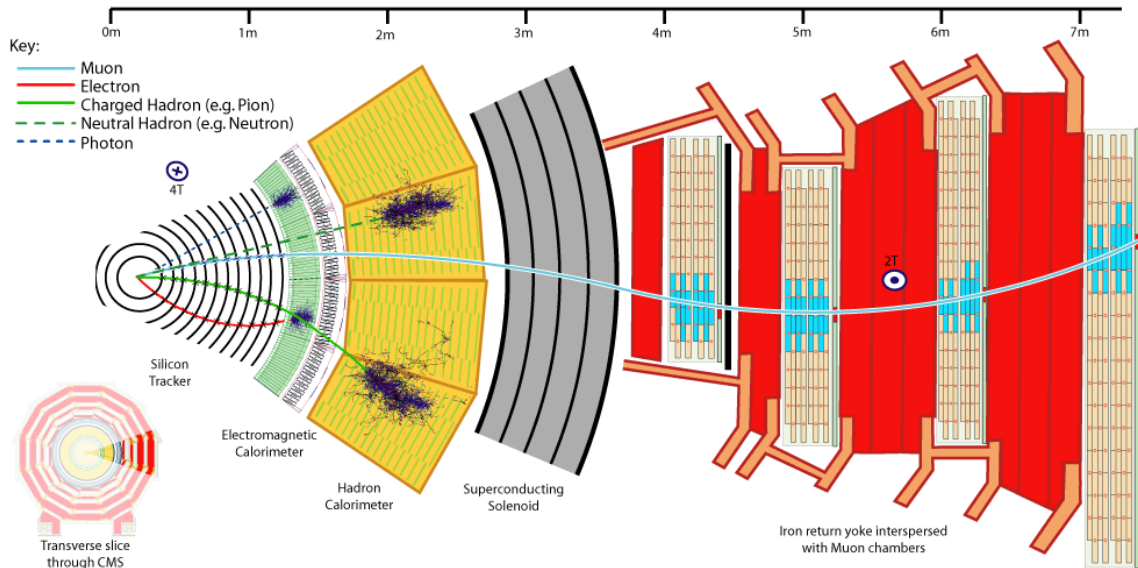


CMS და ATLAS არის ზოგადი ტიპის დეტექტორები -- ანუ არ არის გამიზნული რომელიმე ცალკეული პროცესის შესასწავლად მხოლოდ

- დეტაქტორი შედგება ფენებისგან



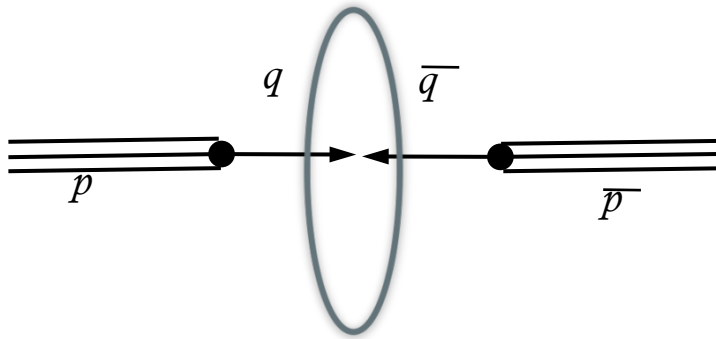
- თითოეული ფენა აფიქსირებს გარკვეული ტიპის ნაცილაკებს



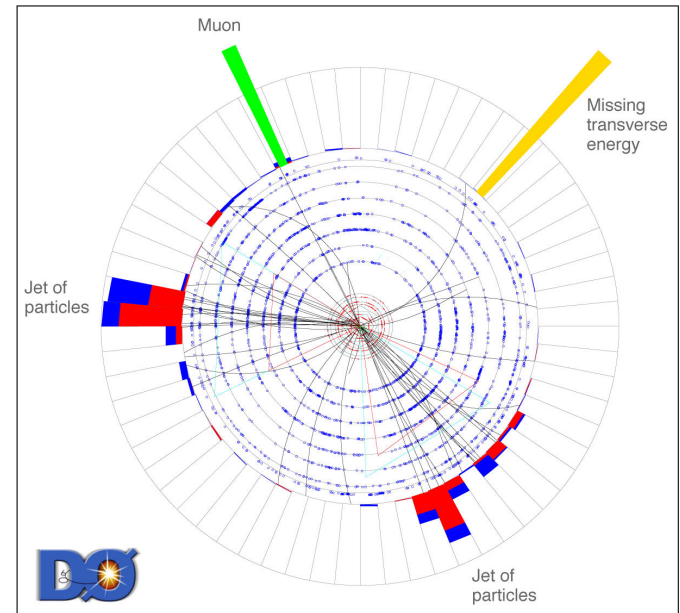
Particle type	Tracking	ECAL	HCAL	Muon
γ				
e				
μ				
Jet				
Et miss				

- ნიუტრინო არ ურთიერთქმედებს დეტექტორთან

საწყისი იმპულსი არაა ცნობილი

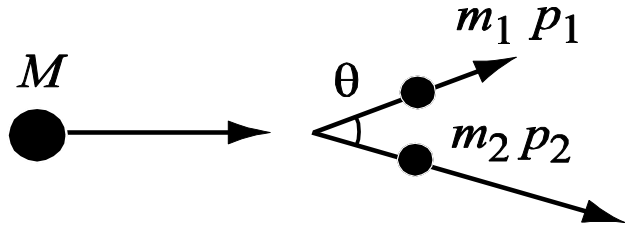
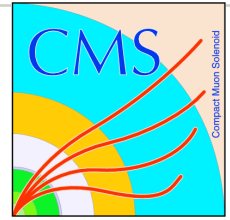


საწყისი იმპულსი პერპენდიკულარულ სიბრტყეში არის ნული \rightarrow იმპულსის შენახვის კანონის საფუძველზე საბოლოო იმპულსი პერპ. სიბრტყეში უნდა იყოს ნული





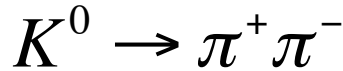
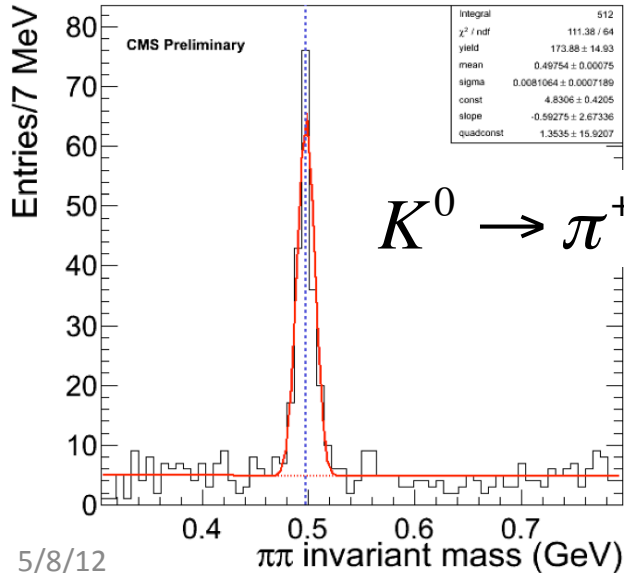
არასტაბილური ნაწილაკების დეტექტირება



არასტაბილური ნაწილაკების დეტექტირების ძირითადი მეთოდია მათი დაშლის პროდუქტების დაფიქსირება, მახასიათებელი სიდიდეების გაზომვა და შემდგომ თვით არასტაბილური ნაწილაკის აღდგენა - ინვარიანტული მასის, იმპულსის, ენერჯის და სხვა სიდიდეების დათვლა.

ორი ნაწილაკის ინვარიანტული მასა :

$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - p_1 p_2 \cos \theta)$$



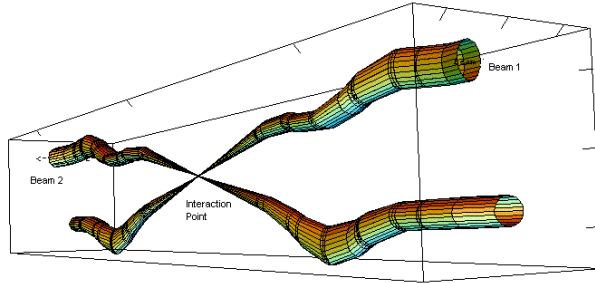
M არის K^0

m_1 არის π^+ შესაბამისი იმპულსით p_1
 m_2 არის π^- შესაბამისი იმპულსით p_2

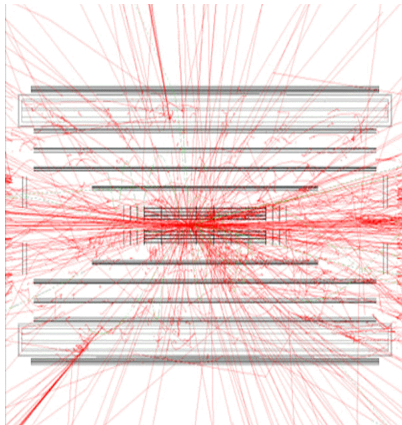
ნაწილაკებს m_1 და m_2 ვაფიქსირებთ დეტექტორების საშუალებით, იმპულსებს p_1 და p_2 ვზომავთ

მონაცემთა ანალიზი

მონაცემების შეგროვება



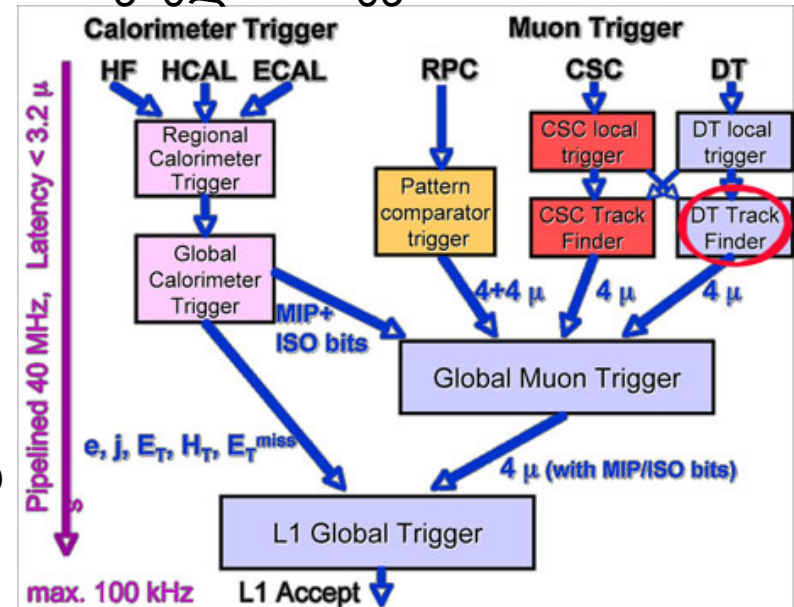
Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

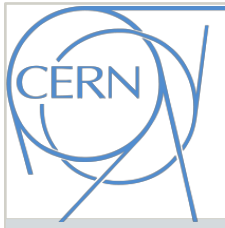


იმ მოვლენების ჩაწერა ხდება რომლებიც შესაძლოა საინტერესო პროცესის შედეგი იყოს

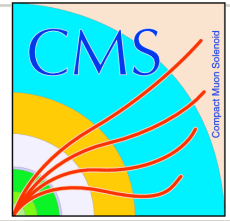
ნაკადები კვითს ყოველ 25 ნწ შედეგად გვაქვს ~600 მილიონი შეჯახება წამში

ტრიგერის შერჩევას ძალიან დიდი მნიშვნელობა აქვს





მონაცემთა გადამუშავება



- სხვადასხვა ალგორითმების და პროგრამების გამოყენებით ხდება მონაცემების გადამუშავება და დაფიქსირებული ნაწილაკების პარამეტრების (იმპულსი, მუხტი, კოორდინატები, ენერგია...)

მონაცემთა მართვა ეტაპობრივი სისტემით

T0 at CERN

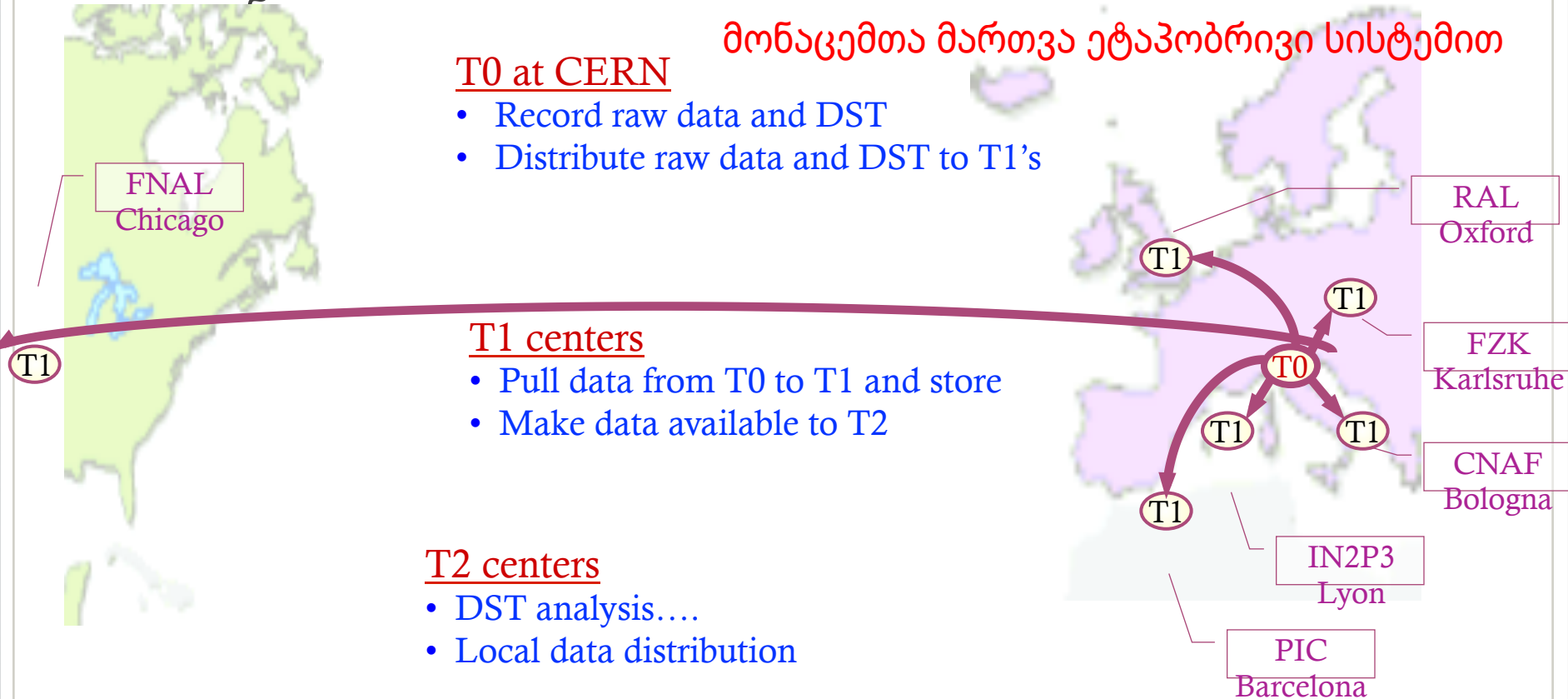
- Record raw data and DST
- Distribute raw data and DST to T1's

T1 centers

- Pull data from T0 to T1 and store
- Make data available to T2

T2 centers

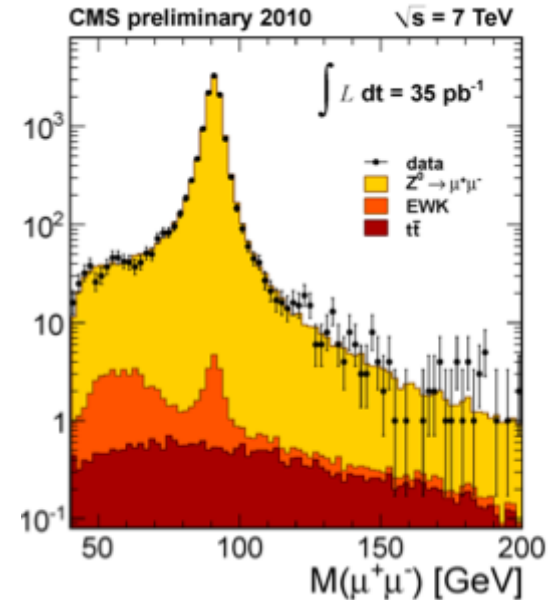
- DST analysis....
- Local data distribution



- მონაცემთა ანალიზი ხდება პროგრამების/ალგორითმების საშუალებით
 - თითოეულ მოვლენაში ელემენტარული ნაწილაკების მონაცემების (პარამეტრების) აღდგენა
 - დეტექტორის გაზომვების დაზუსტება, შესწორება
 - შედგენილი ნაწილაკების დაფისირება თუ ჩვენ შესასცავლ პროცესში ველით მათ წარმოქმნას



www.shutterstock.com · 72710569

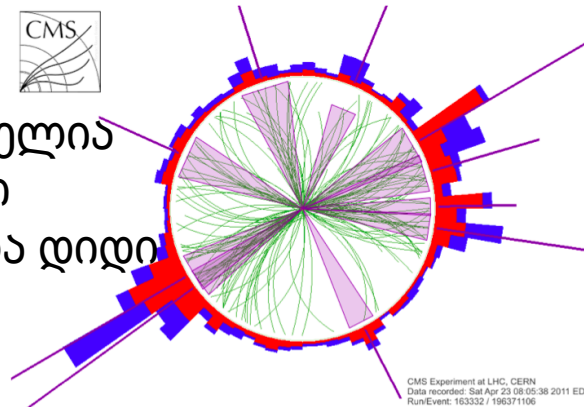


- არსებობს თეორიული მოდელი და ექსპერიმენტული მონაცემები

- უნდა შემოწმდეს მონაცემები რამდენად შეესაბამება ამა თუ იმ მოდელს

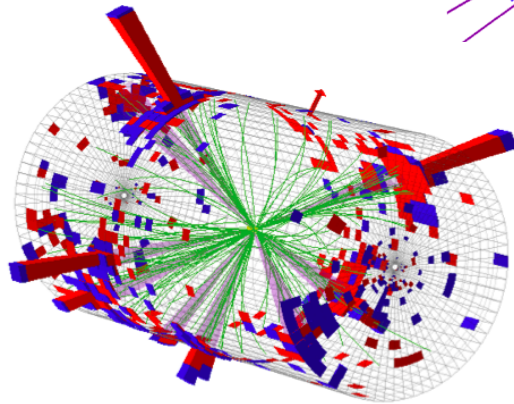


შედეგად მოსალოდნელია ერთდროულად ბევრი ნაწილაკის წარმოქმნა დიდი ჯამური იმპულსით

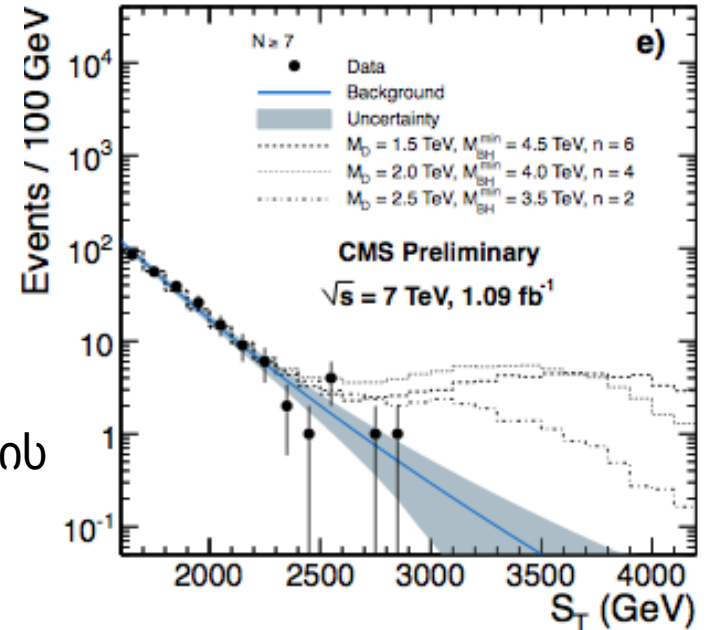


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sat Apr 23 08:05:38 2011 EDT
Run/Event: 163332 / 196371106

მაგ. შავი ხვრელის ძიება



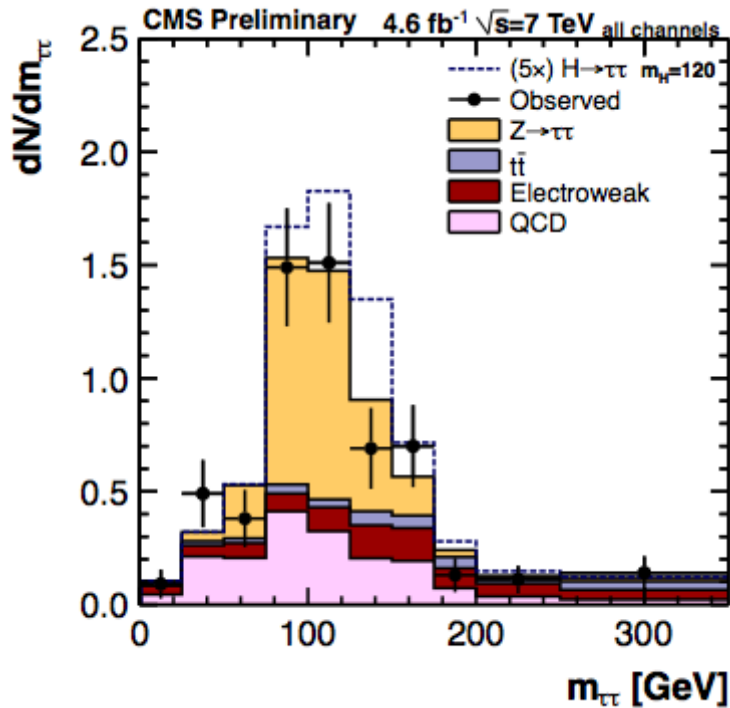
მნიშვნელოვანია ფონური პროცესების კარგი ცოდნა



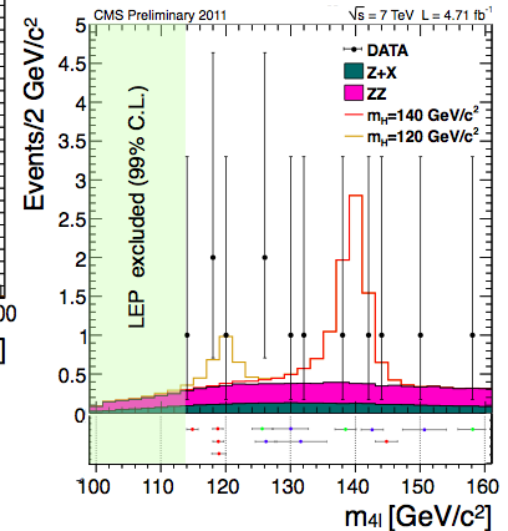
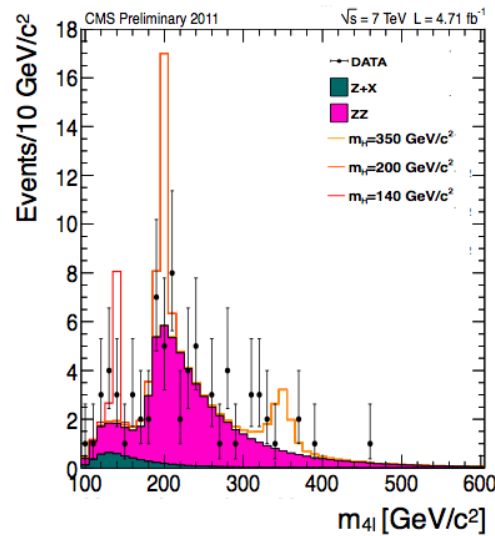
Higgs-ის ძიება

- Higgs სხვადასხვა ნაწილაკებში შეიძლება დაიშალოს. მაგ.

$H \rightarrow \tau\tau$

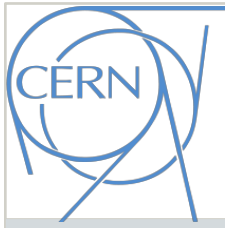


$H \rightarrow ZZ$

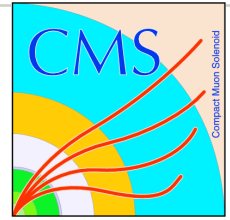


აქამდე შეგროვილი მონაცემებით მხოლოდ იმის თქმა შეგვიძლია რომ თუ Higgs არსებობს მისი მასა არის 114 – 129 GeV შუალედში

BACKUP



ნაწილაკების იდენტიფიკაცია



- ❖ ნაწილაკების იდენტიფიკაცია ჩერენკოვის გამოსხივების დეტექტორების საშუალებით
- ❖ ნაწილაკების იდენტიფიკაცია გარდამავალი გამოსხივების დეტექტორების საშუალებით
- ❖ ელექტრონების იდენტიფიკაცია ელექტრომაგნიტური კალორიმეტრების საშუალებით

ჩერენკოვის გამოსხივება დაკავშირებულია დამუხტული ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარესთან n გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე გარემოში. მისი მეშვეობით შესაძლებელია გავზომოთ ნაწილაკის სიჩქარე რაღაც სიზუსტით. ამასთანავე თუ გვაქვს გაზომილი დამოუკიდებელი გზით ნაწილაკის იმპულსი შესაძლებელია შევაფასოთ ამა თუ იმ ნაწილაკის მასა



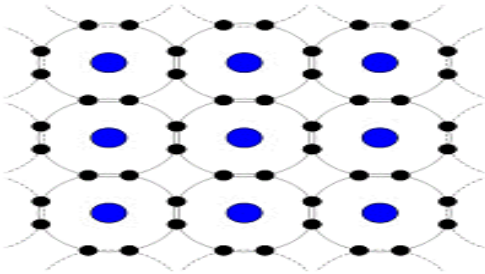
ჩერენკოვის გამოსხივება წარმოადგეს ლურჯ სინათლეს, ვრცელდება ნაწილაკის მოძრაობის მიმართულებით გარკვეულ სხეულოვან კუთხეში და მისი დაფიქსირება ხდება ფოტოგამამრავლებლებით

გარდამავალი გამოსხივების დეტექტორების მოქმედების პრინციპი დაფუძნებულია დამუხტული ნაწილაკის მოძრაობაზე სხვადასხვა გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე შრეებათ განლაგებულ ნივთიერებაში. გარდამავალი გამოსხივება დამოკიდებულია ნაწილაკის მუხტზე და გამა ფაქტორზე. რაც უფრო დიდია ნაწილაკის გამა ფაქტორი, გამოსხივება მით უფრო ინტენსიურია. მოცემული იმპულსისათვის მსუბუქი ნაწილაკის გამა ფაქტორი უფრო დიდია ვიდრე მძიმე ნაწილაკის.

From Computer Desktop Encyclopedia
 Reproduced with permission.
 © 2008 TechBites Interactive

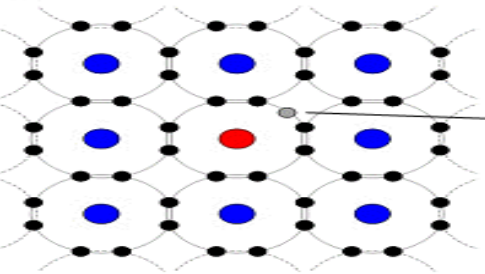
Pure Silicon

● Silicon nuclei



N-Type Silicon

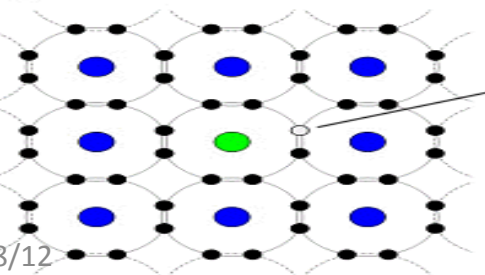
● Phosphorous nucleus



The phosphorous atom creates an extra electron.

P-Type Silicon

● Boron nucleus

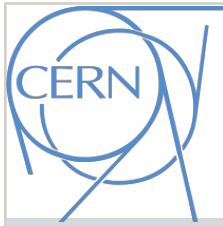


The boron atom creates a hole. ○

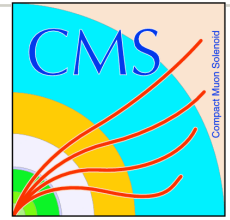
სილიკონის ატომს გარეთა შრეზე გააჩნია ოთხი ელექტრონი, ამიტომ ქმნის კრისტალურ სტრუქტურას რომელიც პირველ სურათზეა მოყვანილი

სილიკონის ერთი ატომი ჩანაცვლებულია 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

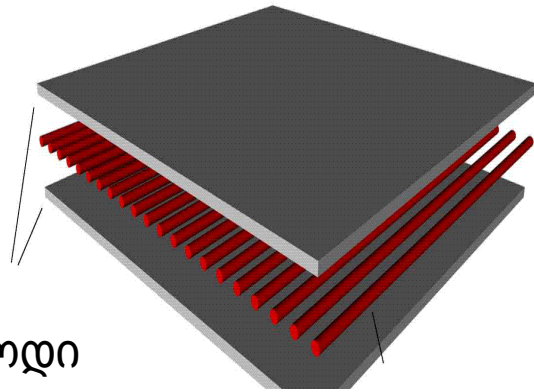
სილიკონის ერთი ატომი ჩანაცვლებულია ბორის ატომით, რომელსაც გარეთა შრეზე აქვს სამი ელექტრონი. კრისტალურ სტრუქტურას აკლია ერთი ელექტრონი ეგრეთ წოდებული P-ტიპის სილიკონი



კოორდინატის განსაზღვრა და ტრეკის აღდგენა

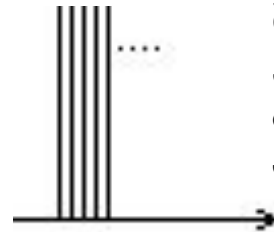


თუ ბევრ მავთულს განვალაგებთ ერთმანეთის პარალელურად გარკვეული ბიჯით მაშინ შეგვეძლება უფრო ზუსტად აღვადგინოთ კოორდინატი



კათოდი

ანოდური მავთულები



მავთულების ასეთი კოფიგურაციით შესაძლებელია კოორდინატის განსაზღვრა ერთი ღერძის გასწვრივ. ვერტიკალურად განლაგებული მავთულები ზომავენ X კოორდინატს

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

