

DLTP2024: ATLAS en de LHC

Stephen Nicholas Swatman
27 september 2024

Iets over mij

- Geboren (1996) en getogen in Amsterdam Oost
- Ik had van jongs af aan al veel interesse in computers(pelletjes)
- VWO afgemaakt aan het **Cygnus Gymnasium** in 2014
 - Drie keer bijna gezakt! BSc en MSc in **informatica** bij UvA
- Daarna **Doctoral Student Programme** bij **Nikhef + CERN**
 - In 2020 naar Frankrijk verhuisd
- Op dit moment **QUEST** bij CERN...

Iets over mij

- Toen ik op de middelbare school zat was het curriculum nogal anders
- Eindexamen gedaan in **2013**
- Toen amper **quantummechanica**
- Wat er nu in dat curriculum zit: wow!

Opgave 3 Op zoek naar Higgs

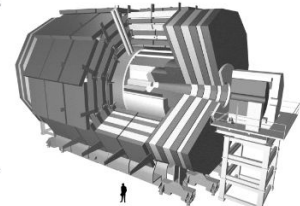
Lees het artikel.

Bij het onderzoekscentrum CERN in Geneve laten natuurkundigen in de LHC (Large Hadron Collider) protonen met een zeer hoge snelheid op elkaar botsen. Er ontstaan daarbij verschillende deeltjes. Op deze manier toont men het zogenaamde Higgs-deeltje aan. Het Higgs-deeltje is niet rechtstreeks te detecteren. Soms valt het Higgs-deeltje via een vervalreactie uiteen in twee muonen en twee antimuonen.

Een muon heeft dezelfde lading als een elektron, maar is veel zwaarder.

Een anti-muon is even zwaar als een muon, maar heeft een tegengestelde lading.

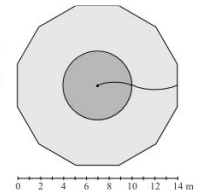
De (anti-)muonen worden waargenomen in de CMS- (Compact Muon Solenoid) detector. Deze 14 meter hoge cilindervormige detector bestaat uit vele lagen waarin de banen van de deeltjes worden vastgelegd. Zie de figuur hiernaast. In het centrum van de detector vindt de botsing van de protonen plaats. Daar wordt door een grote supergeleidende spoel een magnetisch veld gemaakt.



Opengewerkte tekening van de CMS-detector. Midden in de detector vinden de botsingen plaats.

In figuur 1 is de dwarsdoorsnede van de CMS-detector getekend. De cirkel stelt de spoel voor. Daarbinnen (aangegeven met donkergrijs) heerst een homogeen magnetisch veld van 4.2 T. Midden in deze cirkel vindt de botsing plaats. De veldlijnen in die cirkel staan loodrecht op het vlak van tekening en zijn het papier in gericht. Ook buiten de spoel heerst een magnetisch veld (aangegeven met lichtgrijs). De baan van een wegschietend deeltje binnen en buiten de spoel is getekend. Figuur 1 staat vergroot op de uitwerkbijlage.

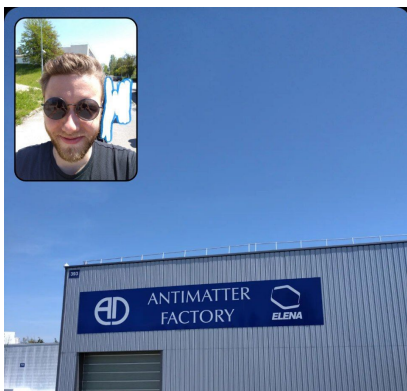
figuur 1



- 3p 13 Leg uit of het deeltje een muon of een anti-muon is. Geef daartoe in de figuur op de uitwerkbijlage de richtingen van het magnetisch veld en van de lorentzkracht binnen de spoel aan.

Over dit praatje

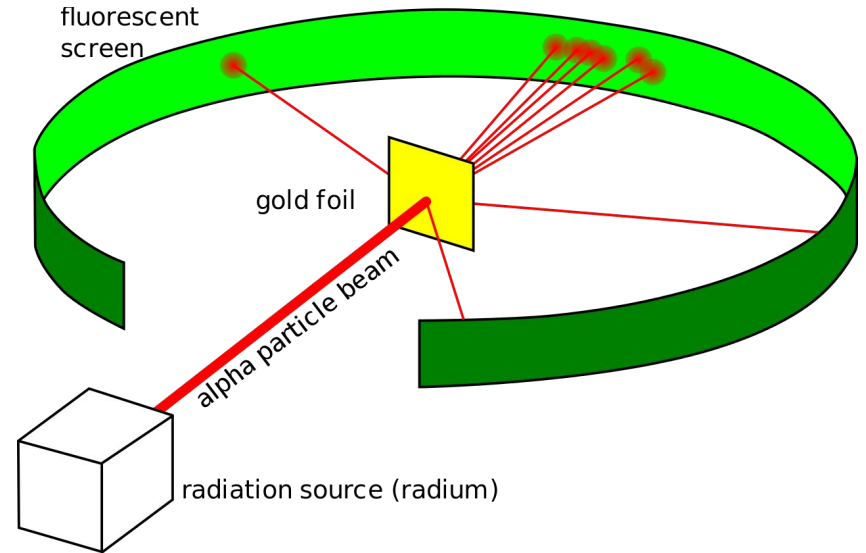
- Ik heb geen BKO, onderwijsbevoegdheid, etc.
- Dit praatje is een aanpassing op een praatje voor studenten
- Mogelijk bepaalde dingen al gezien: skip vooral door
- Ik ben ook gids, dus ik zal wat anekdotes hergebruiken



Deel 1: Versnellers

Versnellers

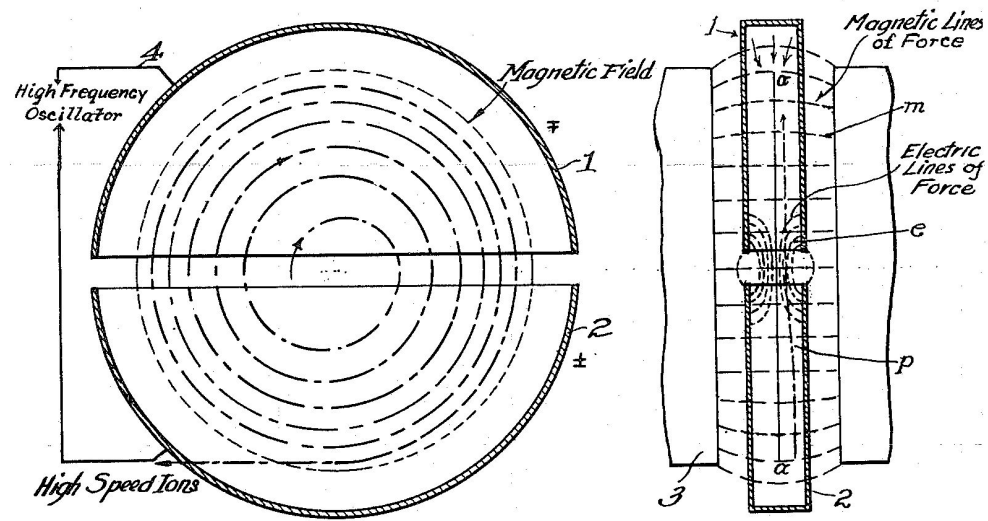
- Energie is voor heel veel dingen nodig...
 - Deeltjes tegen trefplaten schieten
 - Nieuwe, zware deeltjes maken
 - Nabootsen van oerknal-achtige scenarios
- Maar hoe krijg je energie in een deeltje?
- **Rustmassa** staat vast
- Andere optie: deeltje **versnellen** met kinetische energie
- Van oudsher: **kosmische straling**



Bron: Wikimedia Commons

Old school: Cyclotron

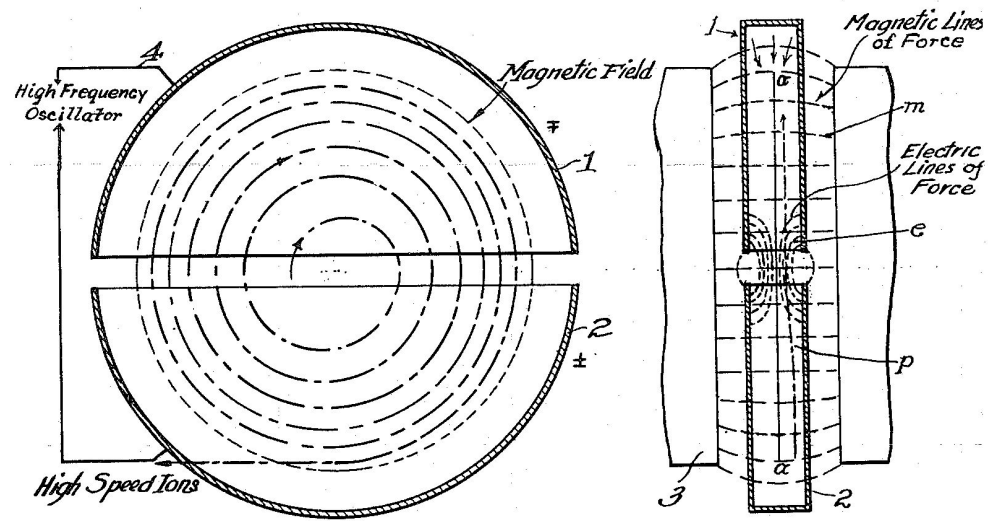
- We weten: een magneetveld versnelt niet!
- In een cyclotron versnellen we deeltjes met elektrische velden, en buigen we ze met magneetvelden
- $\Delta E_k = qU$
- Snellere deeltjes hebben meer stijfheid: buigen minder en maken grotere bocht



Bron: Patent US1948384A

Old school: Cyclotron

- De omlooptijd is afhankelijk van de straal
- $r = mv / Bq$
- $v = 2\pi r / T$
- $r = 2\pi m / BqT$
- $T = 2\pi m / Bq$
- Toename in padlengte compenseert exact voor toename in snelheid!
- Maar niet opgewassen tegen relativistische snelheden. :(

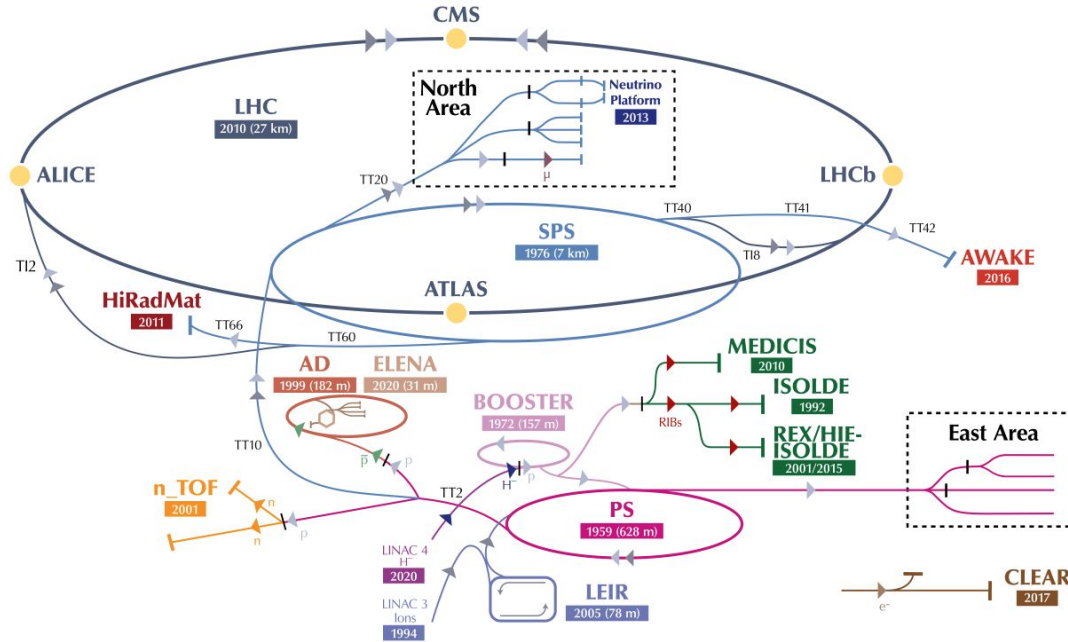


Bron: Patent US1948384A

Het versnellercomplex van CERN

- Moderne versnellers (en experimenten) zijn enorm en enorm complex
- Samenkomst van veel verschillende ideeën:
 - Versnellen en buigen van deeltjes met elektrische en magneetvelden
 - Detecteren van deeltjes
 - Verwerken van enorm veel data
- Versnellerfysica is het onderwerp van vandaag, slechts een deel van wat CERN doet!

Het versnellercomplex van CERN



▶ H^- (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶ \bar{p} (antiprotons) ▶ e^- (electrons) ▶ μ (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear
 Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive
 Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator //
 n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

De LHC

- De **LHC** (Large **Hadron** Collider) is de grootste en krachtigste versneller ter wereld
- Diameter van ongeveer 8.5 kilometer en een omtrek van 27 kilometer
- Op de grens van Frankrijk en Zwitserland
- In 2010 echt begonnen
 - Was niet bepaald makkelijk, veel tegenslagen
- Gebouwd in een bestaande versnellertunnel
 - Was vroeger de Large Electron-Positron Collider





CMS

LHCb

ALICE

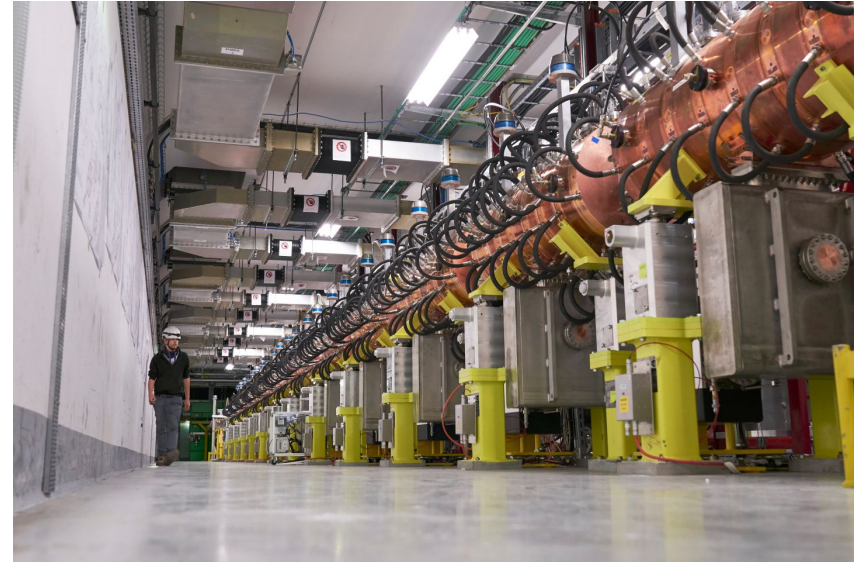
ATLAS

De eV

- In de deeltjesfysica meten we alles in electron-volt: eV
 - De energie die één elektron nodig heeft om één volt te overbruggen
 - $1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Energie: eV
- Massa: eV / c^2 (denk: $e = mc^2$!)
- Impuls: eV / c
- Tijd: nanometer (??)
- En meer (maar dat wordt ingewikkelder!)

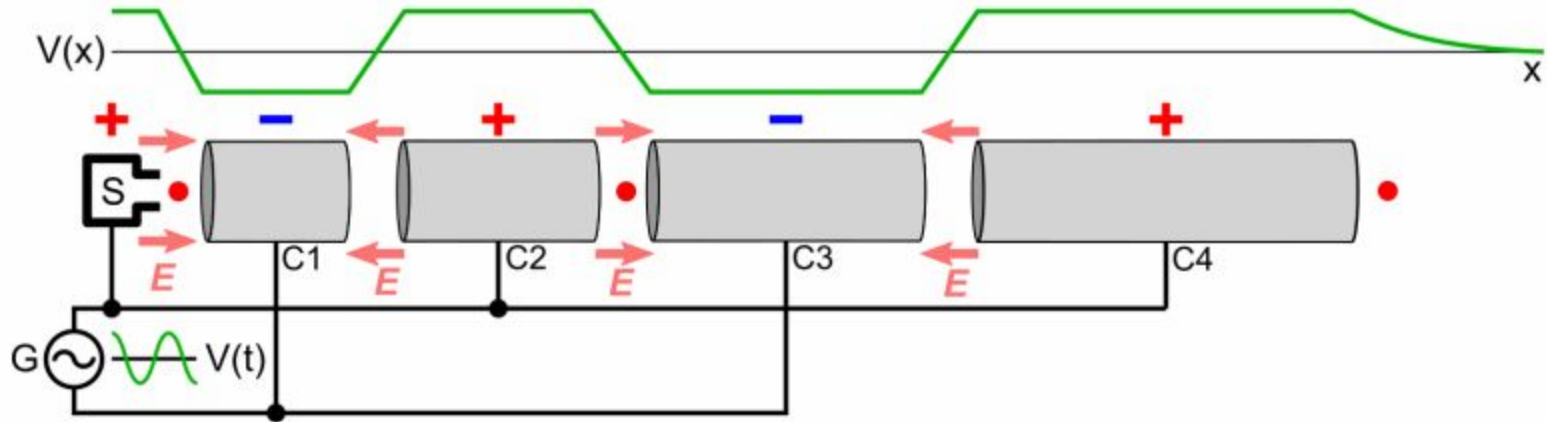
Protonen in de LHC: Linac4

- Protonen beginnen in een vat met waterstofanionen H^-
 - Massa van H^- is ongeveer $938.2 \text{ MeV} / c^2$
- Ieder H^- atoom krijgt in Linac 4 een kinetische energie van 160 MeV
- **Linac4** is een **lineaire** versneller: een serie van snel wisselende elektrische velden



Bron: CERN CDS

Protonen in de LHC: Linac4



Protonen in de LHC: Linac4

- Hoe snel gaan atomen als ze uit Linac4 komen?
- We weten:
 - Rustmassa H^+ is ongeveer 938.2 MeV
 - Aan het einde van Linac4 hebben ze 160 MeV kinetische energie

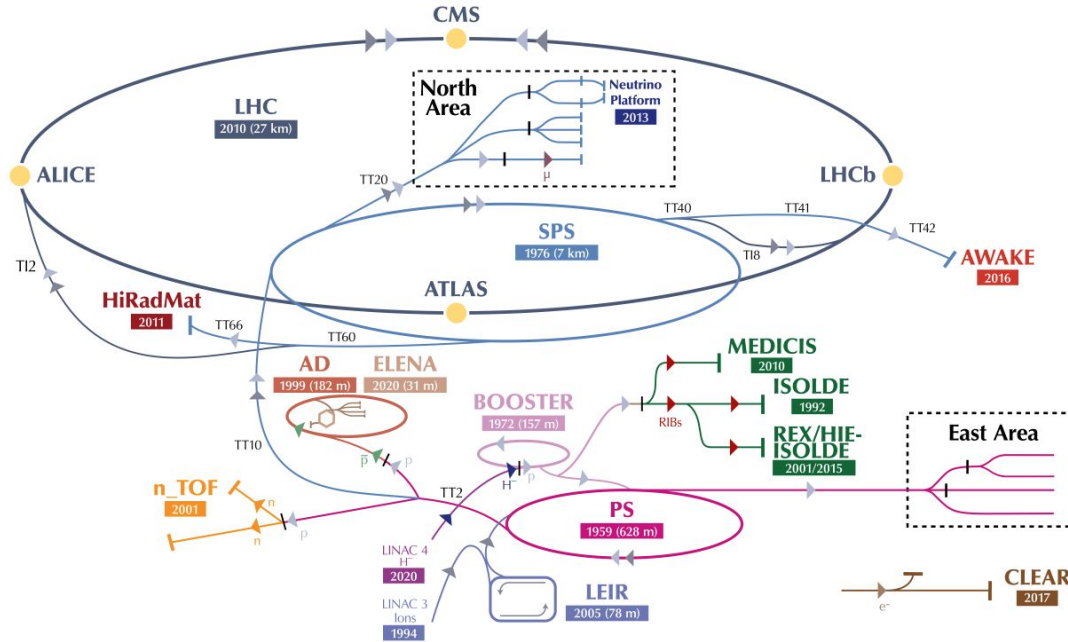
Protonen in de LHC: PSB

- Linac 4 injecteert waterstofionen in de Proton **Synchrotron** Booster
- De protonen verliezen twee elektronen
- Gaan daarna in rondjes: magneetveld voor buiging
- Straal van ongeveer 25 meter
- Versnelt protonen van 160 MeV tot 2 GeV



Bron: CERN CDS

Het versnellercomplex van CERN



▶ H^- (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶ \bar{p} (antiprotons) ▶ e^- (electrons) ▶ μ (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear
 Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive
 Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator //
 n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

Protonen in de LHC: PS

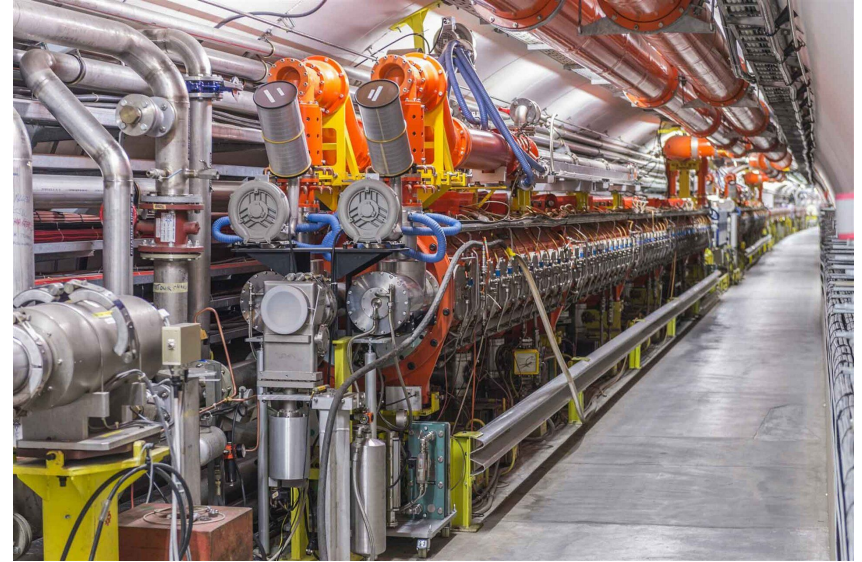
- Protonen met 2 GeV kinetische energie gaan van de PSB naar de proton synchrotron
- In 1959 geopend, toen de krachtigste versneller ter wereld
 - Nu gebruikt als grote booster
- Diameter van ongeveer 200 meter, omtrek van 628 meter
- Versnelt van 2 GeV tot 25 GeV



Bron: CERN CDS

Protonen in de LHC: SPS

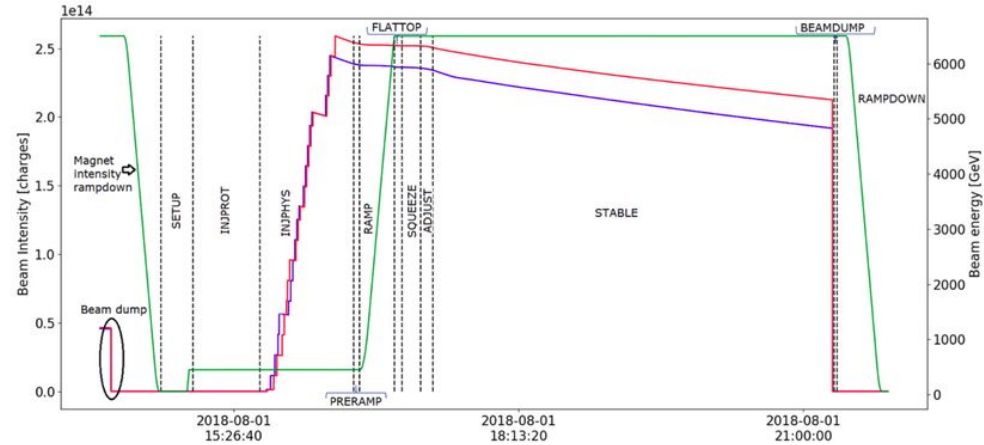
- Met 25 GeV zijn we er nog niet
- We gaan van de Proton Synchrotron naar de **Super** Proton Synchrotron
 - Heel origineel
- Zelfde idee, alleen weer groter: omtrek van 6.9 kilometer dit keer!
- Beetje zuur: toen deze af was hadden de Amerikanen een betere gebouwd
- Toch nuttige ontdekkingen:
 - W en Z bosonen
 - Lading-pariteitssymmetriebreking
- Gaat van 25 GeV naar 450 GeV



Bron: ESA

Protonen in de LHC: LHC

- Nu zijn we er: protonen met 450 GeV gaan de LHC in
- Daar worden ze versneld tot 6.8 TeV (duurt ongeveer 20 minuten)
- Protonen gaan in twee ringen rond
- Ringen worden op vier locaties samengebracht waar ze botsen!
- De intensiteit wordt daardoor lager, en dan **dumpen** we de beam



Bron: Daniel Prelicpean

Vistars

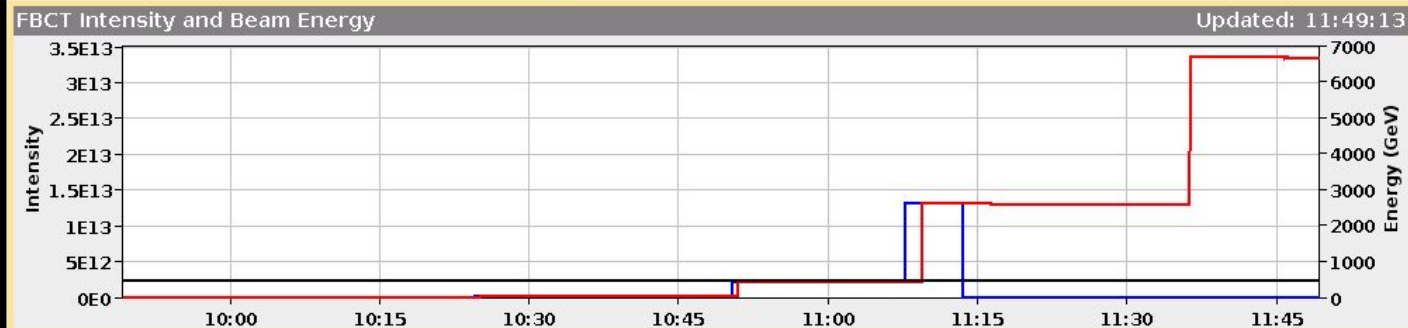
<https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/>

MACHINE DEVELOPMENT: INJECTION PHYSICS BEAM

I TI2: 1.09e+13 I B1: 5.47e+08 I TI8: 2.06e+13 I B2: 3.35e+13

TED TI2: **BEAM** TDISA B1 gap/mm: up: 7.06 down: 7.18

TED TI8: **BEAM** TDISA B2 gap/mm: up: 7.30 down: 7.30



Beam 1: 0 / 5 injections 0 / 348 bunches

Beam 2: 3 / 5 injections 156 / 348 bunches

Comments (27-Sep-2024 09:28:30)

MD12743

BIS status and SMP flags

	B1	B2
Link Status of Beam Permits	false	false
Global Beam Permit	false	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	false	true
Moveable Devices Allowed In	false	false
Stable Beams	false	false

AFS: 25ns_348b_5inj_2x48b_MD6925

PM Status B1 **ENABLED** PM Status B2 **ENABLED**

Protonen in de LHC: Hoeveel

- In de LHC zitten tegelijkertijd (per **fill**) max. 3000 **bunches**
- Iedere bunch bevat ongeveer 1.4×10^{11} **protonen**
- Een fill duurt ongeveer 12 uur
- De LHC staat ongeveer 300 dagen per jaar aan
- Versneller zal in totaal ongeveer 30 jaar dienst doen
- Totaal aantal protonen is... minuscuul

Fill-visualisatie

https://lpc.web.cern.ch/cgi-bin/filling_schemes.py

Fill-informatie

<https://lpc.web.cern.ch/annotatedFillTable.html>

Protonen in de LHC: Totale kinetische energie



Een mug



Een fietser

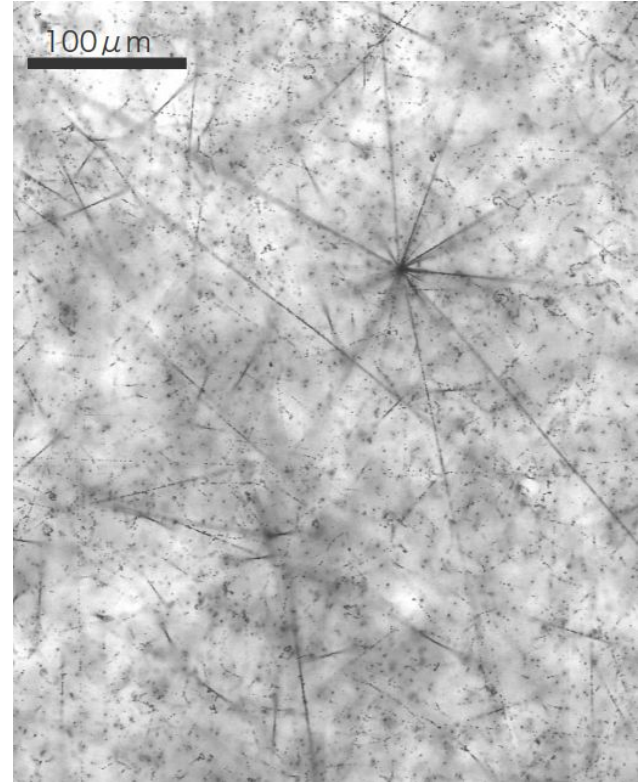


Een ICE-3 hogesnelheidstrein

Deel 2: ATLAS

Experimenten

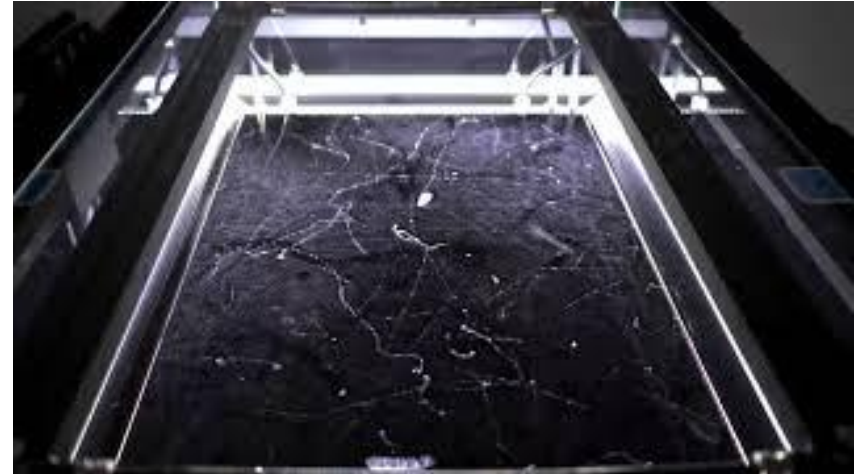
- Protonen botsen is op zich niet zo nuttig
- Je moet iets **waarnemen**: deeltjes kun je lastig zien
 - Rutherford gebruikte bijvoorbeeld een gevoelige plaat
- Vroeger gebruikten ze **zilver in gelatine**, soort fotofilmpje
- Een deeltje beweegt zich door de **nucleaire emulsie** heen, die verkleurt



Bron: Akira Nishio

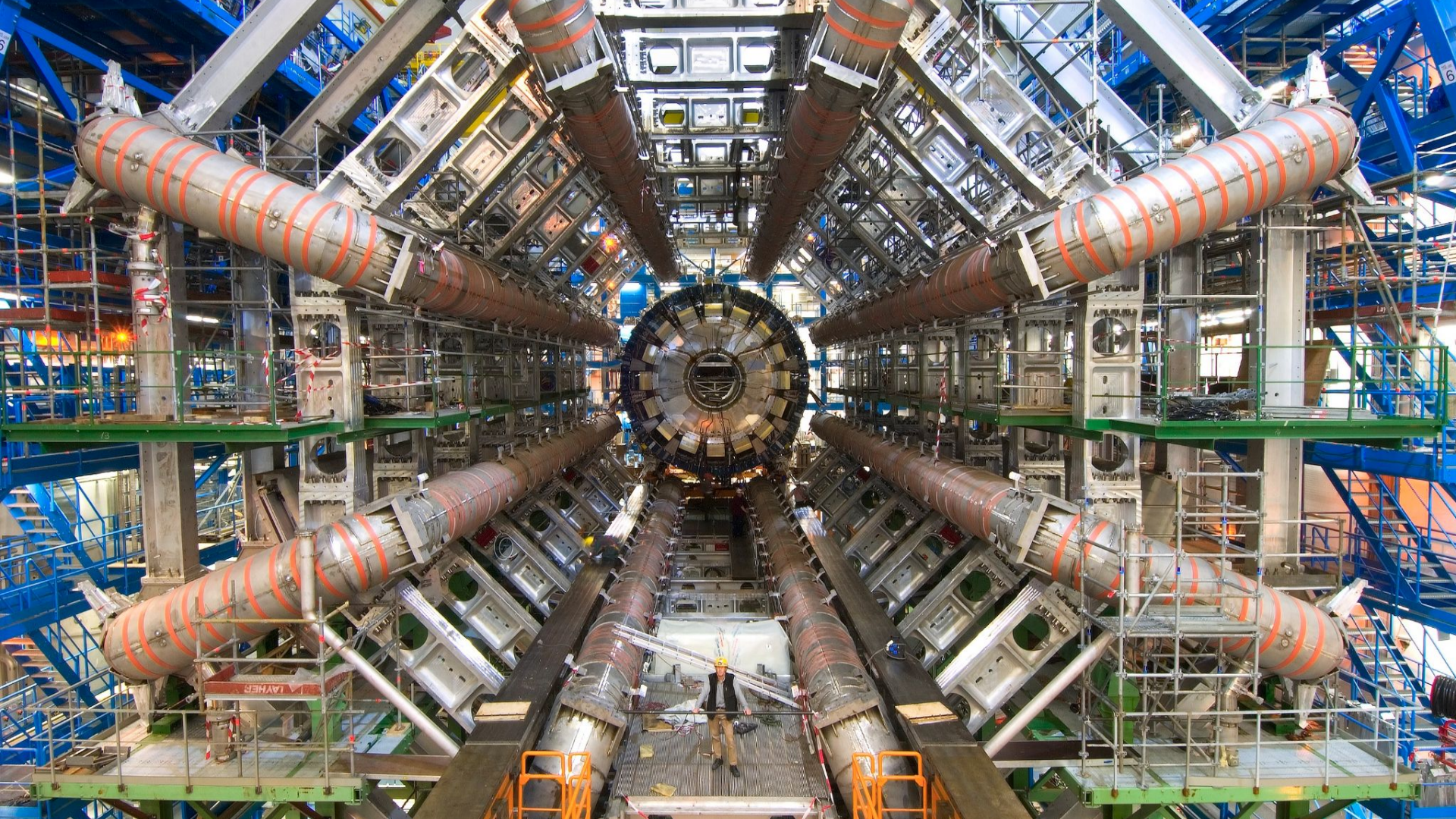
Experimenten

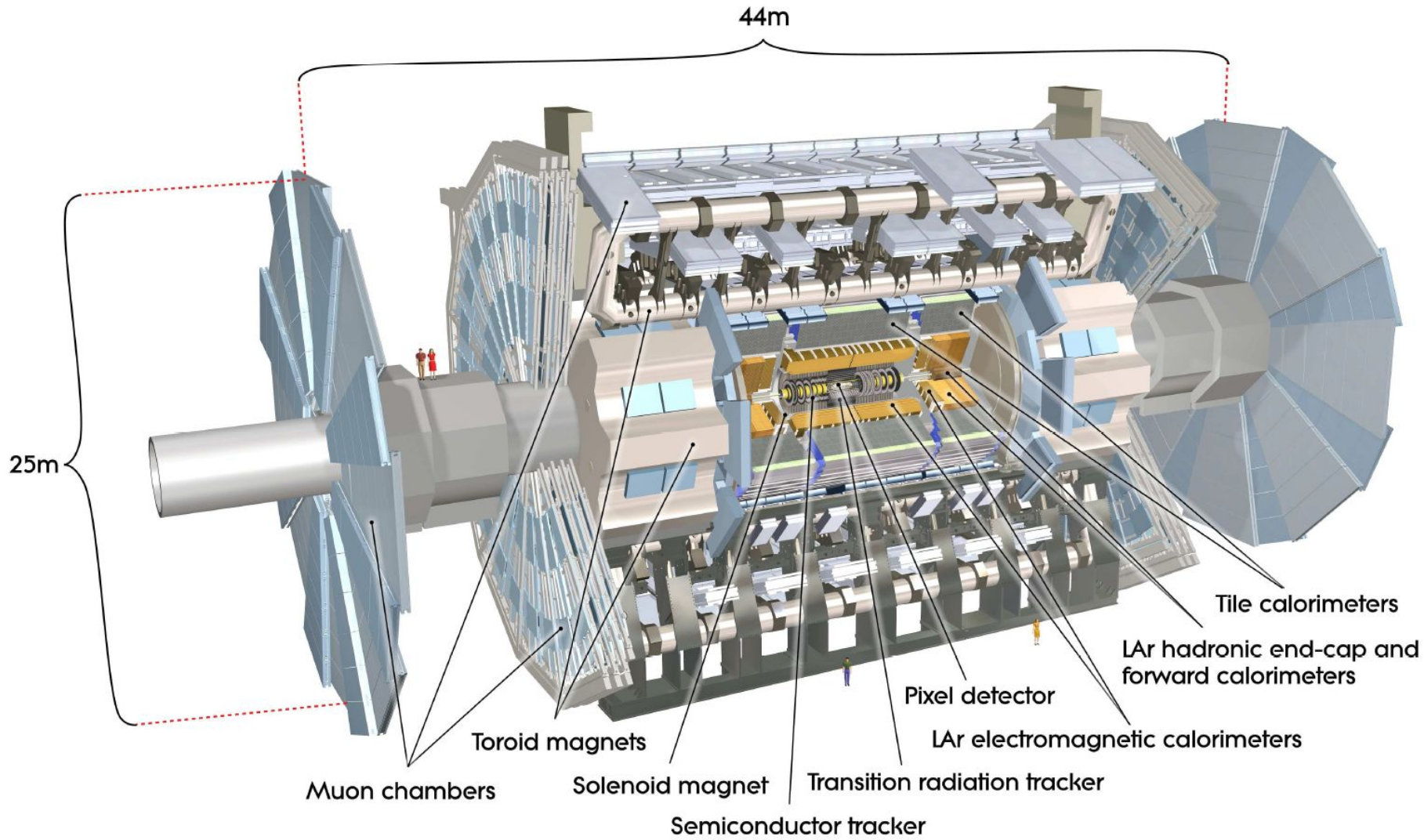
- Je hebt ook andere technieken:
 - Nivelvaten
 - Bellenvaten
- Soortgelijk idee: vloeistof verkleurt
- Keert daarna terug naar normaal, en dus herbruikbaar
- Met een camera kun je dan fotos maken van de trajecten



Experimenten

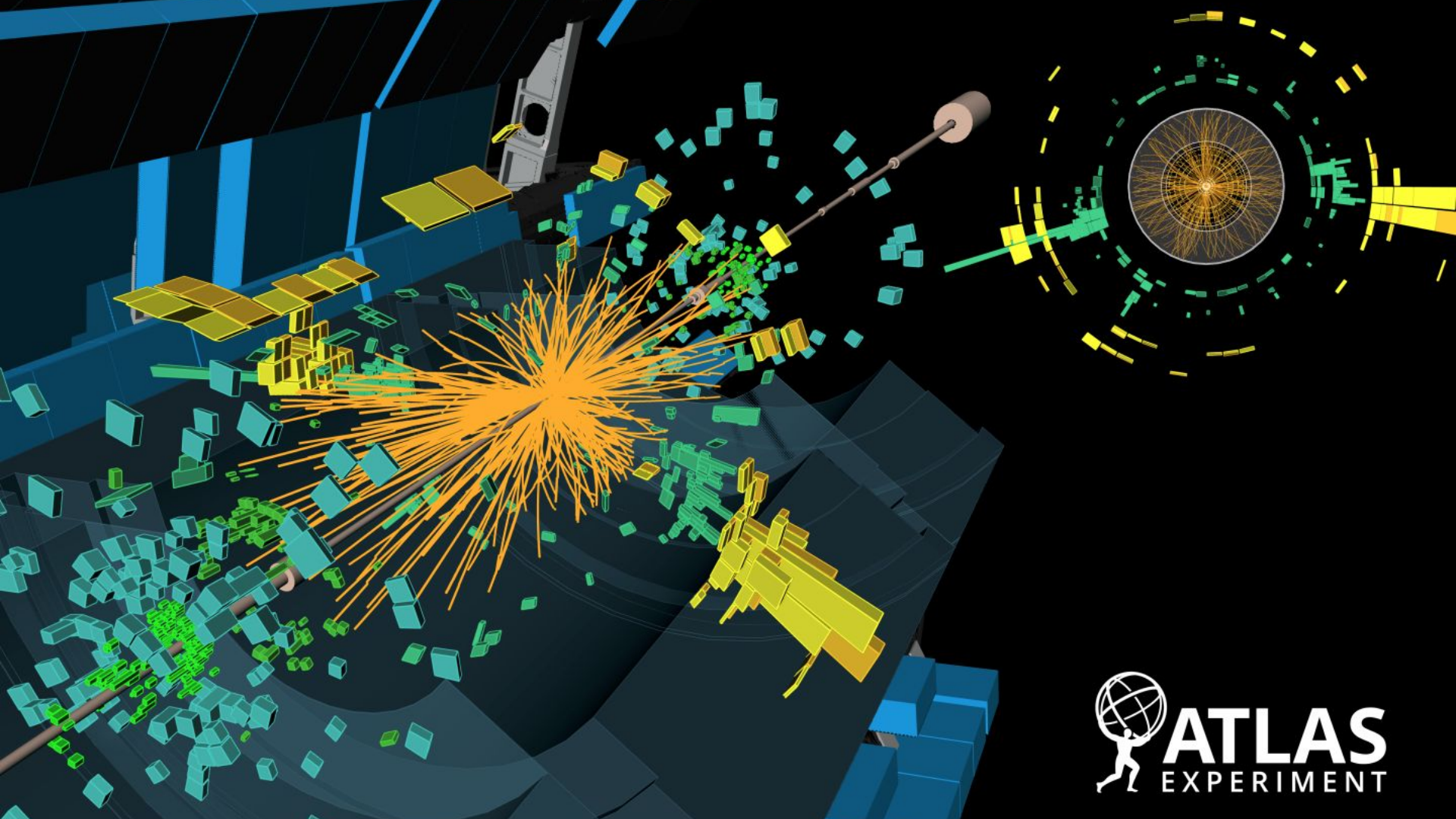
- Probleem: bunches treffen elkaar **40 miljoen keer per seconde***
 - Probeer daar maar eens fotos van te maken
- Daarom enorme driedimensionale camera's met extreme uitleessnelheden
- Op de LHC staan een aantal experimenten:
 - ATLAS
 - CMS
 - ALICE (denk aan de talk van Mike!)
 - LHCb
 - ...en meer!





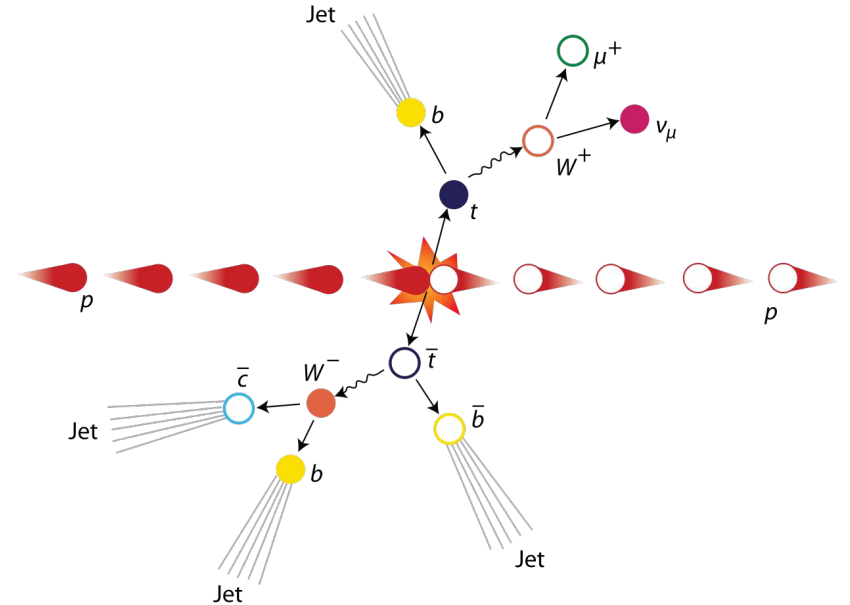
ATLAS

- Protonen botsen in het midden van de detector op elkaar
 - Bunches zijn nu ongeveer 16 micron, dus grotere kans op botsingen
 - Ongeveer 20-80 p - p botsingen per kruising (dus >1 miljard per seconde)
- De energie in de deeltjes moet ergens naartoe: nieuwe deeltjes!
- Door de deeltjes precies te meten kunnen we de stijfheid onder een magneetveld berekenen
 - En daarmee de energie



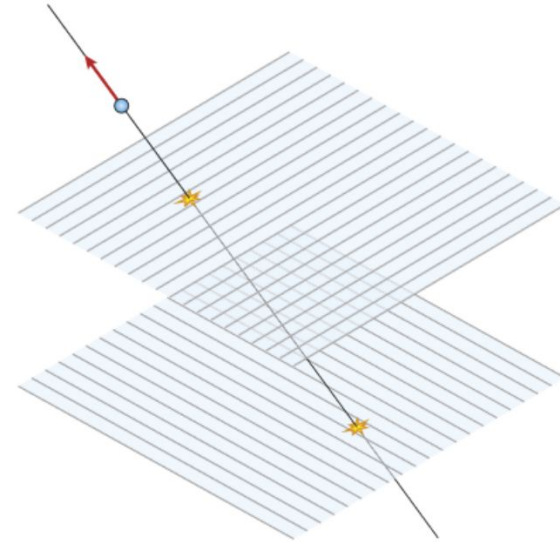
ATLAS: Events

- In een botsing gebeuren allerlei interessante natuurkundige fenomenen
 - Hadronisatie
 - Paarproductie
 - Bremsstrahlung
 - Verval
- Allemaal onder behoud van leptongetal, etc.!
- En dit tot wel 80 peer ker kruising, met 40 miljoen kruisingen per seconde



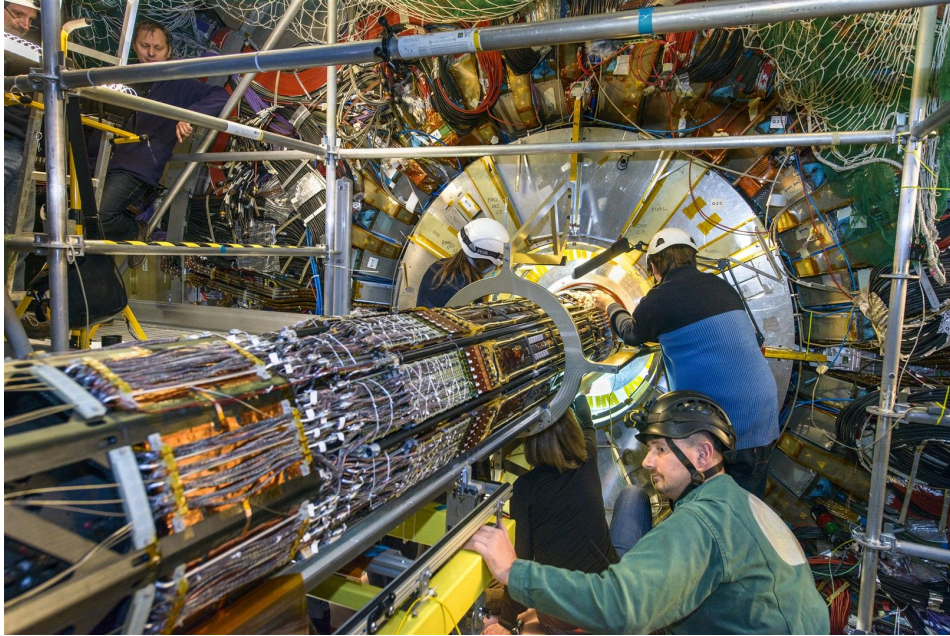
Moderne meettechnologie

- ATLAS bevat soort-van dradenkamers...
 - Ruimte vol met draden
 - Als een deeltje passeert ioniseert het een gas, en er ontstaat een lading op de draad
 - Dit lezen we uit en met computer bepalen we dan waar het deeltje was
- ...en siliciumdetectoren
 - Lijken een beetje op de camera in je telefoon
 - Maar dan veel, veel sneller

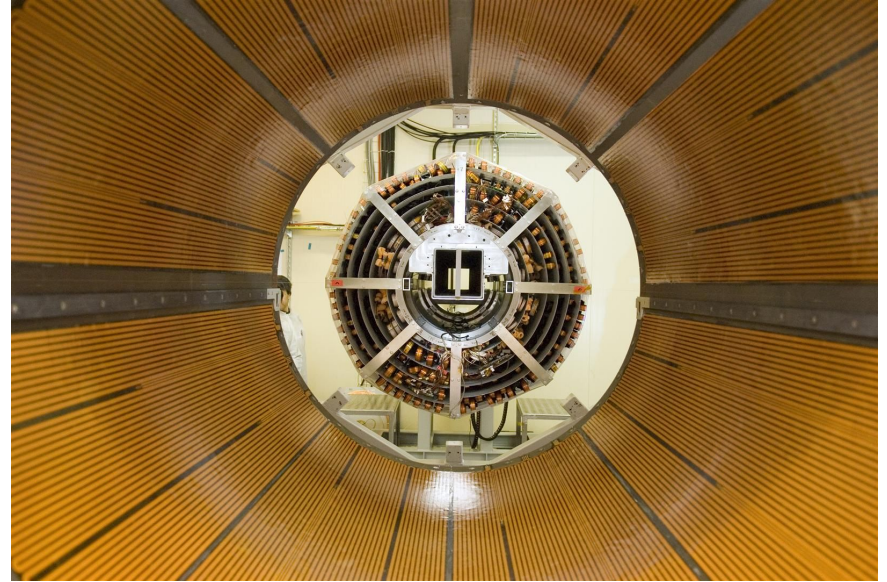


Bron: Katern

ATLAS Pixels & SCTs

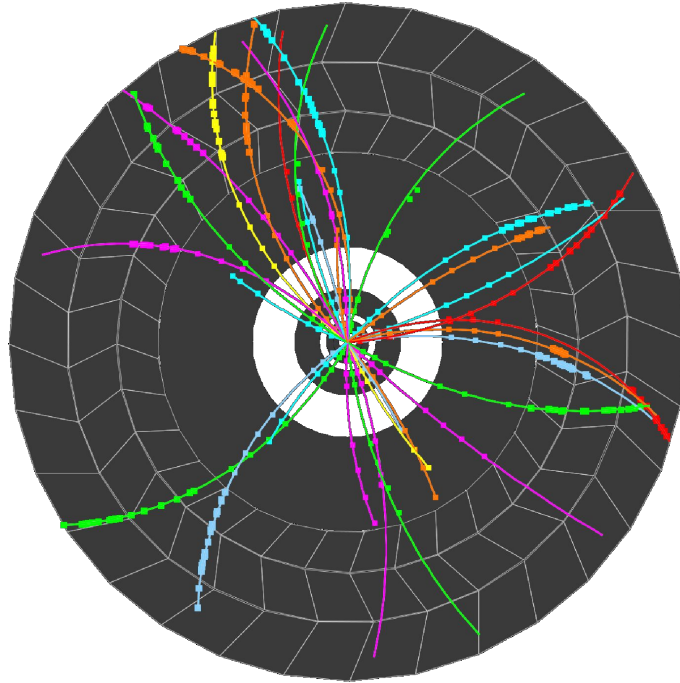


iPhone 16



iPhone 3

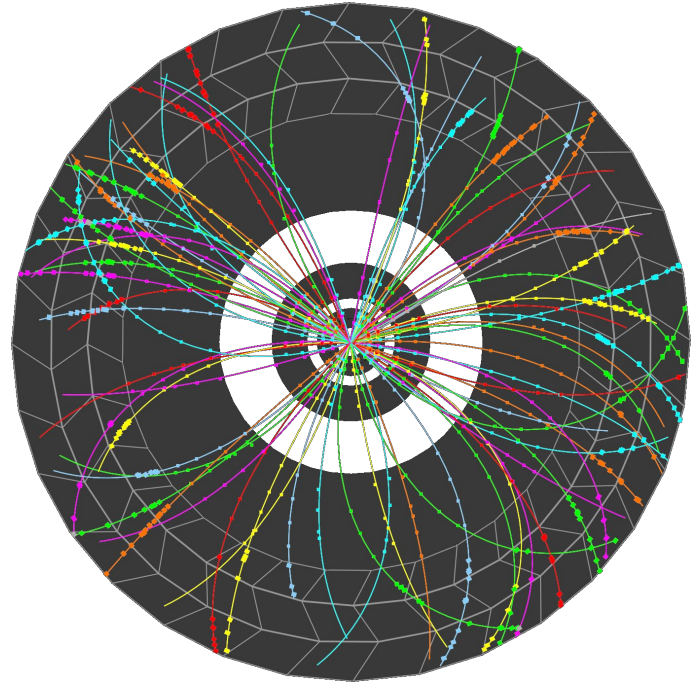
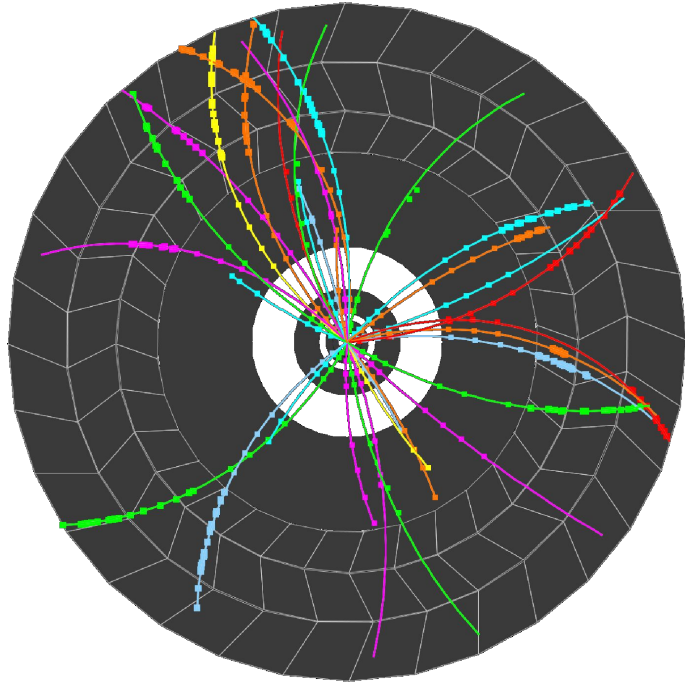
Trajecten meten



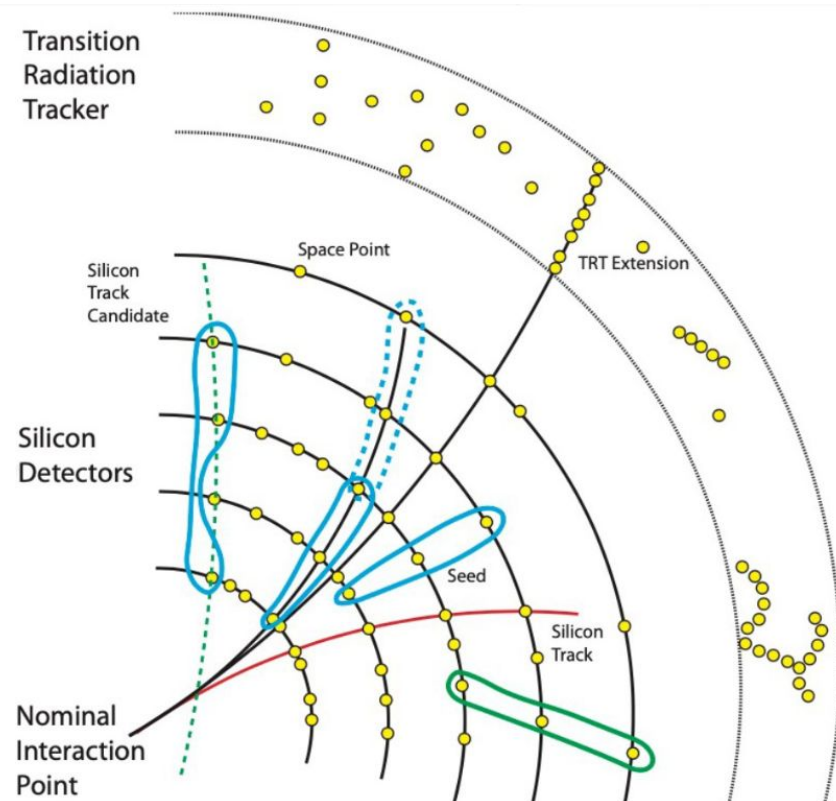
HL-LHC

- We meten de productiviteit van een versneller in “luminositeit”
 - Luminositeit = “hoe vaak gebeurt er iets”
 - Gemeten in inverse oppervlakte per tijd
 - “ATLAS heeft $6.6 \times 10^{40} \text{ cm}^{-2}$ verzameld”
 - In de HL-LHC gaat de luminositeit van $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ naar 5 keer zoveel
 - Nauwere bunches
 - Meer protonen
 - Meer crossings per seconde
 - En de “pile-up” van 20-80 naar 200!
- Inelastische proton-proton botsingen hebben een doorsnede van 60 mb
 - $60 \text{ mb} * 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 600 \text{ MHz}$
 - Processen zoals Higgsproductie zijn zeldzamer, dus hebben kleinere doorsnede

HL-LHC



Track reconstructie

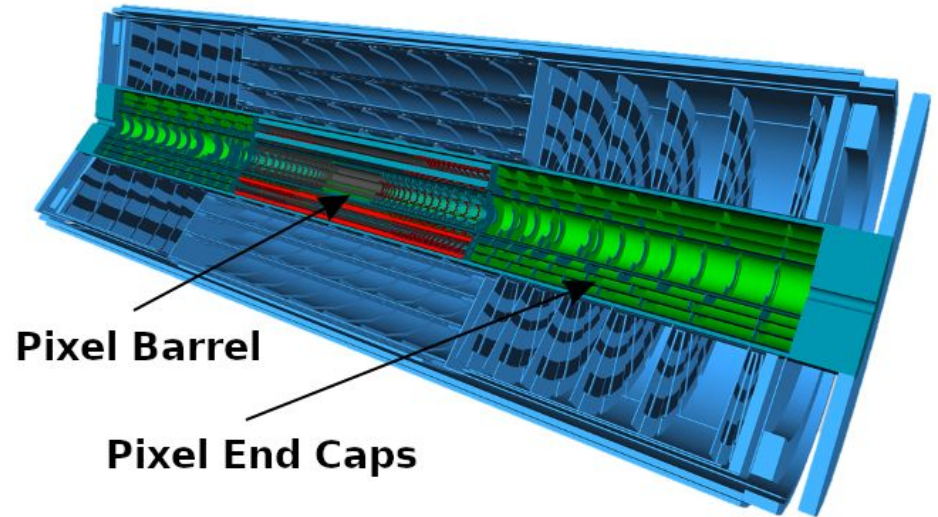


Informatica bij CERN

- ATLAS heeft ongeveer 100 miljoen kanalen om uit te lezen
- 40 miljoen kruisingen per seconde (meer dan LEP!)
- Na weggooien van lege data ongeveer 1.4 MB per kruising = 56 TB per seconde = 1 miljoen TikTok video's per seconde
- Dit kunnen we nooit allemaal opslaan! Oninteressante data gooien we weg:
- “Level 1 trigger” gooit 499 uit 500 weg: 75,000 Hz blijft over
- “Level 2 trigger” gooit weer 49 uit 50 weg: 1,500 Hz blijft over

ATLAS ITk

- ATLAS krijgt een volledig nieuwe inner tracker: de ITk
 - Staat het dichtst bij het botsingspunt
- Daarmee gaan we van 100 megapixels naar meerdere gigapixels
- Dat brengt nogal wat uitdagingen met zich mee!
- Veel meer data, én veel meer botsingen



Informatica bij CERN

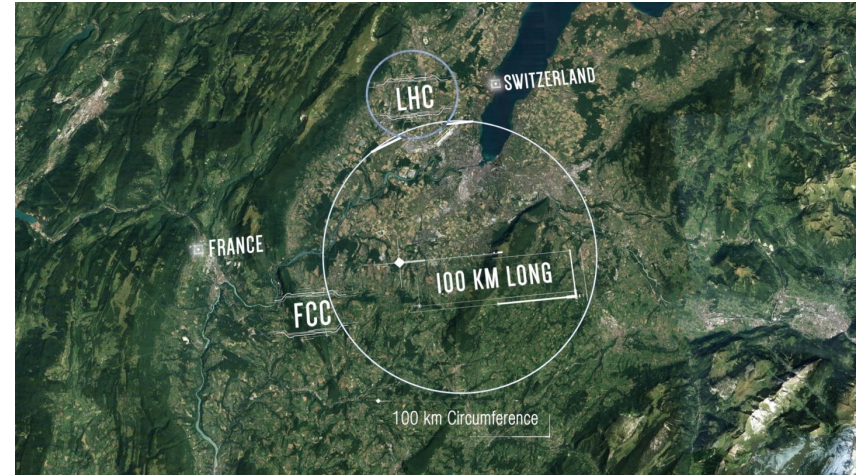
- We moeten dus heel snel bepalen of een botsing “interessant” is of niet
- Heel veel servers werken hieraan
- Mijn onderzoek: kunnen we grafische kaarten gebruiken om dit sneller te doen?
- Daarmee kunnen we dan nog meer data aan, als hogere energieën hebben, betere collimatie, of betere detectoren!



Bron: NVIDIA

Nog sneller en nog groter: de FCC en ILC

- Plannen om een nog grotere versneller te bouwen: de **Future Circular Collider**
- 100 kilometer in omtrek en een energie van 100 TeV!
- LHC zou dan een booster worden
- Doel is om nog preciezer en nog meer te meten
- Kosten: 9 miljard euro: is dat het waard?
 - Hoeveel waarde hechten we aan het begrijpen van het universum?
- Andere optie: International Linear Collider (in Japan?)



Bron: CERN CDS

Mogelijkheden bij CERN

- CERN biedt enorm veel **kansen** voor leerlingen en studenten!
- **Summer student programme** (voor bachelor studenten)
- **Technical student programme** (voor master studenten)
- **Doctoral student programme** (voor na je master)
- Hou dit in je achterhoofd als je hier misschien zou willen werken!
 - Of je nou natuurkunde, wiskunde, informatica, etc. wilt doen!

