



# Introduktion till accelerators (med visst fokus på LHC)

Roderik Bruce

(tack för visst material från T. Pettersson)



# Innehåll

- Grundläggande principer för acceleratorer
- Linjära acceleratorer
- Cirkulära acceleratorer; synkrotroner
- Magneter för att styra strålen
- Partikel-dynamik i acceleratorn
- Grundläggande om LHC
- LHCs operation
- Utmaningar
- Kollisioner och luminositet
- Framtida planer för LHC

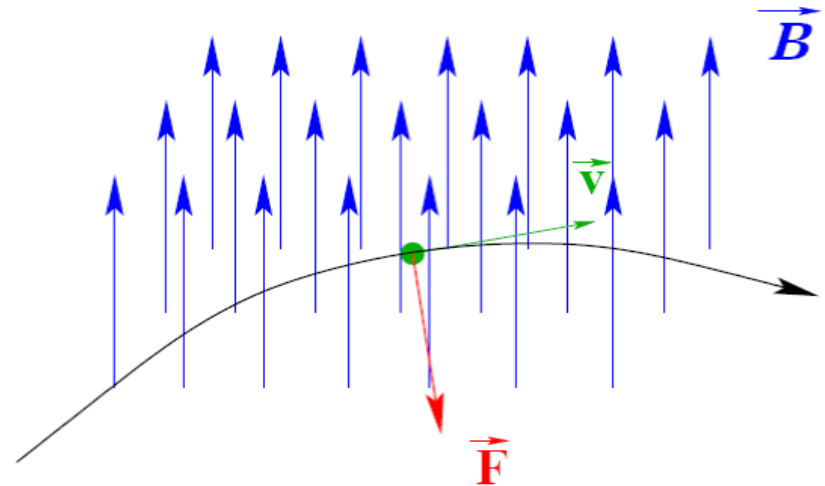
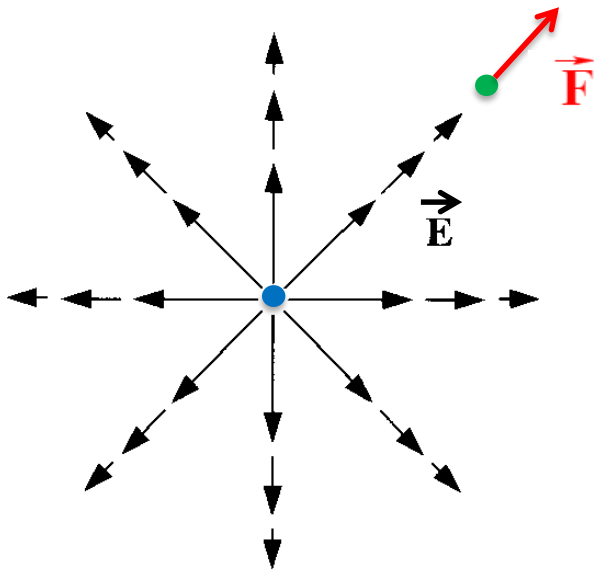
# Grundläggande principer

Wikipedia: En partikelaccelerator är en anordning där laddade partiklar, främst partiklar som elektroner, positroner och protoner, accelereras till höga energier med elektriska fält.

Lorentz-kraft:  $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}).$

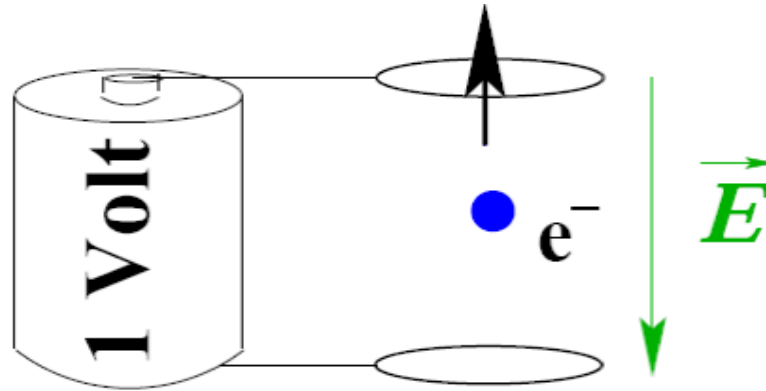
Kan öka energin hos laddade partiklar

Kan styra en laddad partikels riktning





# Enheter: ElektronVolt



*Elektronvolt, energienhet med beteckningen eV, används som enhet för små energier (Joule)*

*1 eV definieras som den energi som åtgår för att flytta en elektron, vars laddning är  $e$  (ca.  $1.602 \cdot 10^{-19}$  C) i ett elektriskt fält med styrkan 1 V/m sträckan 1 meter:*

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule.}$$

**Acceleration**

*Inom partikelfysik används elektronvolt även som enhet för massa, eftersom massa och energi är nära sammanbundet genom sambandet:*

$$E = mc^2$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}; \beta = v/c$$

*$m$  är partikelns massa och  $c$  ljusets hastighet i vakuum. Vilomassan för en elektron är cirka  $0.5 \text{ MeV} / c^2$ .*

**Total energi**

*Från Wikipedia*



# Varför acceleratorer?

- **Experiment inom partikelfysik och kärnfysik**
  - T.ex. “collider”: två accelererade partikelstrålar kolliderar i en detektor för att studera kollisionsprodukter.
  - Exempel: LHC
- **Produktion av synkrotronljus**
  - Laddade partiklar avger ljus då deras bana “böjs”.
  - Kan producera kraftfull röntgenstrålning med stor variation i frekvens för att studera mycket små objekt (“mikroskop”)
  - Exempel: MAX IV i Lund
- **Spallationskällor: produktion av neutroner**
  - Accelererade protoner krockar med en fix måltavla. Neutroner produceras, används för att studera mycket små objekt
  - Exempel: ESS i Lund
- **Medicinska tillämpningar: cancerterapi**
  - Accelererade partiklar träffar tumör där de avger energi och bryter ner tumören
  - Exempel: MedAUSTRON
- .... med mera



# När används respektive leptoner och hadroner i colliders?

## Lepton versus Hadron Collider

● Leptons: (  $e^+$  /  $e^-$  )

■ *elementary particles*

→ *well defined energy*

→ *precision experiments*

● Hadrons: (  $p^+$  /  $p^-$  )

■ *multi particle collisions*

→ *energy spread*

→ *discovery potential*

● Example:

$Z_0$

1985 Sp $\bar{p}$ S

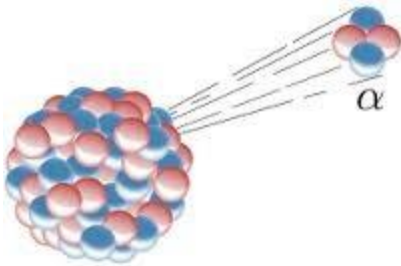
$p^+p^-$

1990 LEP

$e^+e^-$



# Hur det började

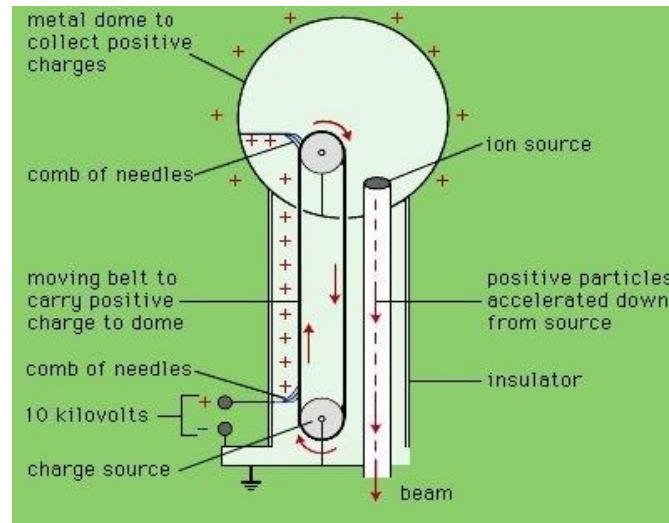


wikipedia

- E. Rutherford (f. 1871) upptäckte att han kunde använda partiklar som strålade ut från radioaktiva material (alfa partiklar och elektroner) för att "titta in" in i atomer.
- Alfa partiklar har en energi runt 5 MeV (motsvarar en hastighet av  $\sim 15,000$  km/s).
- Naturliga partikelkällor visade sig snabbt vara för begränsade och ohälsosamma.....

# Partikelkällor och partikelacceleration

- Partiklarna måste vara i vakuum (rör eller tankar) för att inte kollidera med eller störas av andra partiklar.
- En konstgjord källa med elektrostatiska fält användes för det första accelerationssteget efter källan (Van de Graaff,..) 1920
- Begränsning: accelererande spänning som kan uppnås







# Linjära accelerators

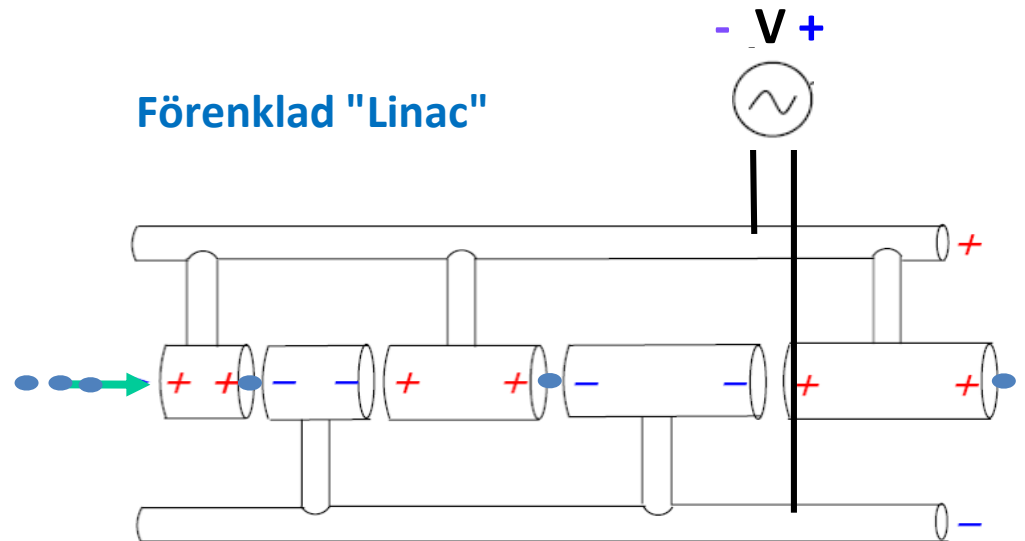
*Wideroe*  
*1928*

Partiklar passerar longitudinella elektriska fält som varierar i tiden (RF – radio frequency)

Partiklarna färdas i drifttuber (utan fält) under större delen av tiden

Partiklarna grupperas för att fältet skall ha rätt riktning för en grupp ("bunch") som just då passerar gapet

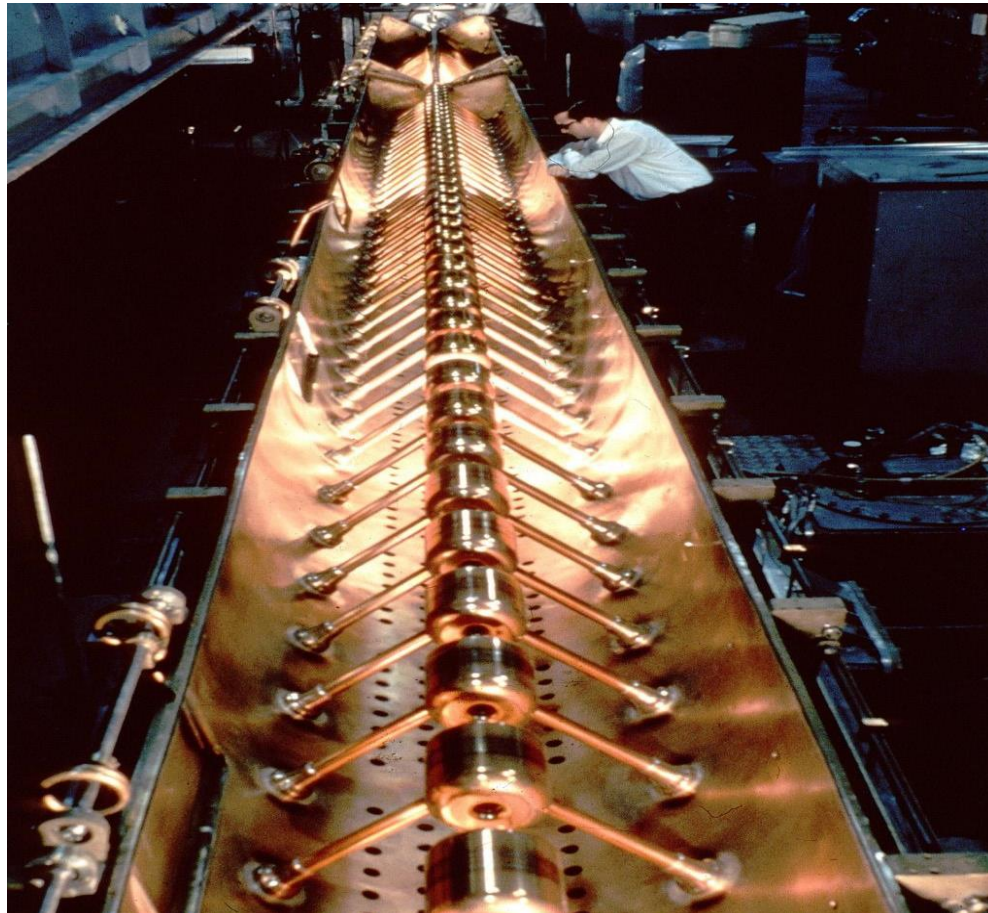
Hastigheten hos partiklarna ökar, modulernas längder ökas för att vara synkroniserade med fältrikningen över gapet



# LINAC - från ritning till verklighet

Partiklarna grupperas för att fältet skall ha rätt rikning för en grupp som just då passerar gapet

Hastigheten hos partiklarna ökar, modulernas längder ökas för att vara synkroniserade med fältrikningen över gapet





# Stanford Linear Accelerator – gränsen nådd (1960 talet..)? 3.2 km, e+e-, 50 GeV

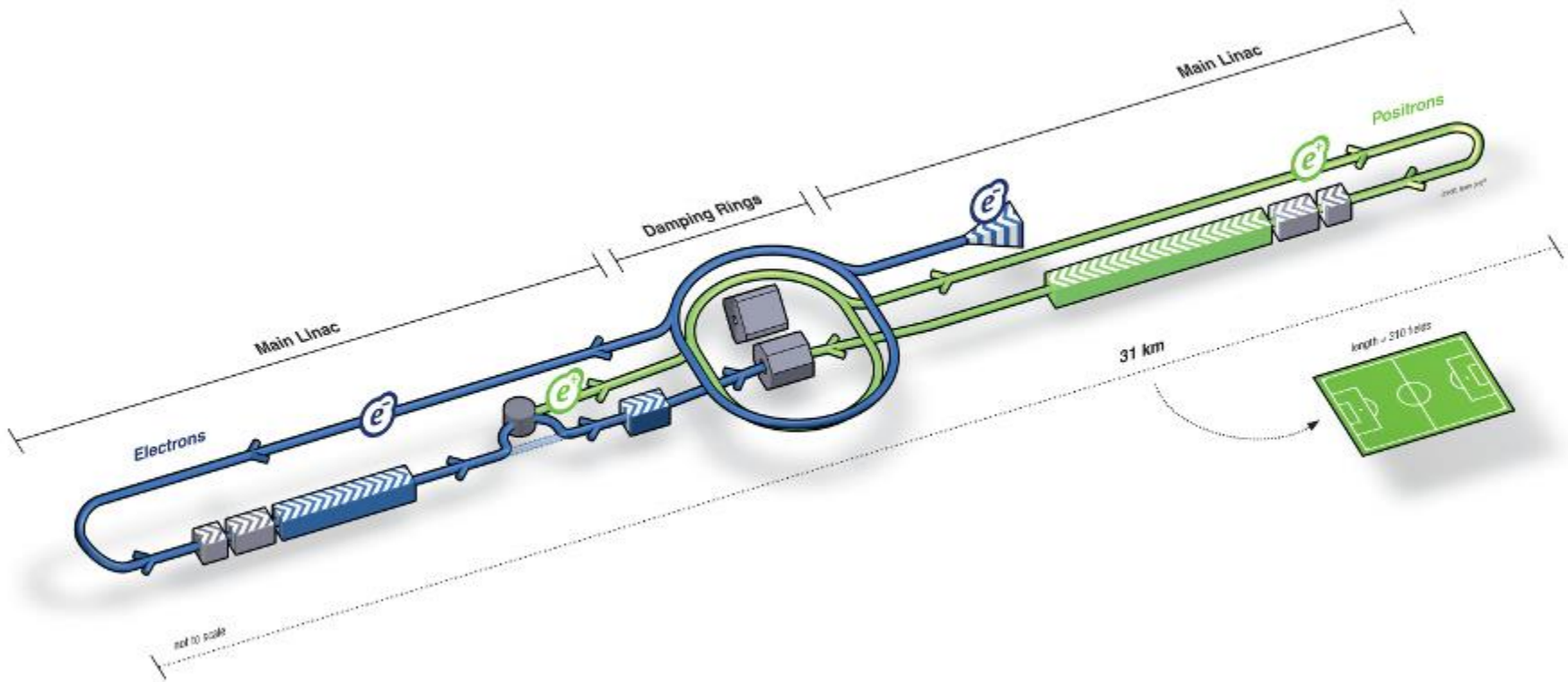






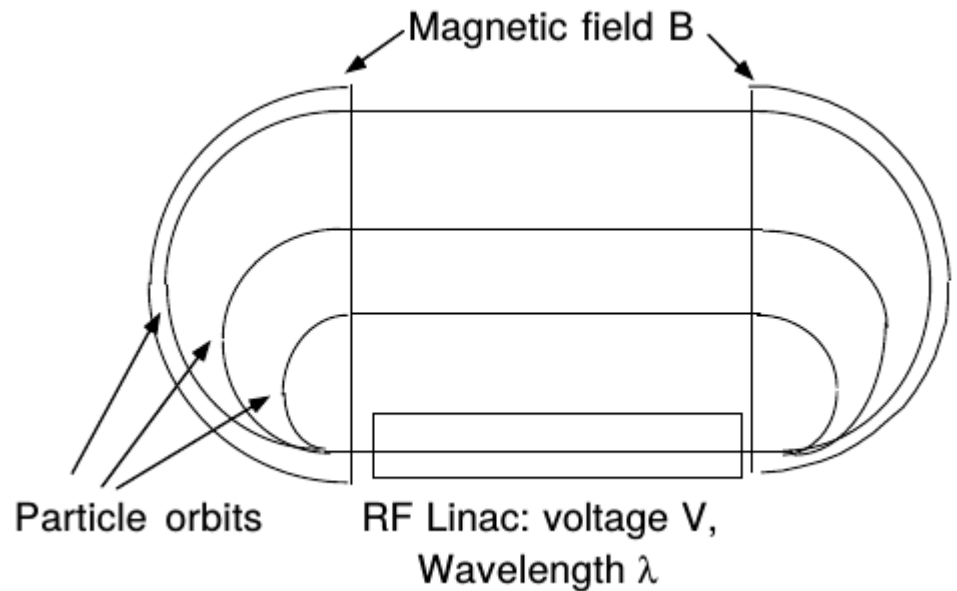
# International Linear Collider – lite längre till 30-50 km, $e^+e^-$ , 500 GeV – 1 TeV

Projekt på design-stadiet. Inte bygd än...



# Betatron

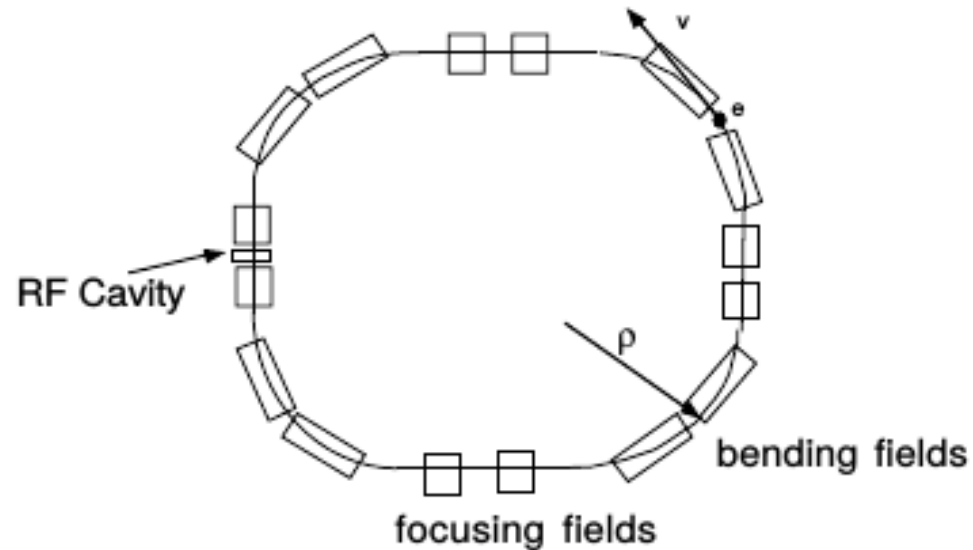
- Använd samma linac flera gånger om
- Styr strålen runt med magnetfält
- När energin på partiklarna ökar, ökar även deras krökningsradie i magnetfältet





# Synkrotron

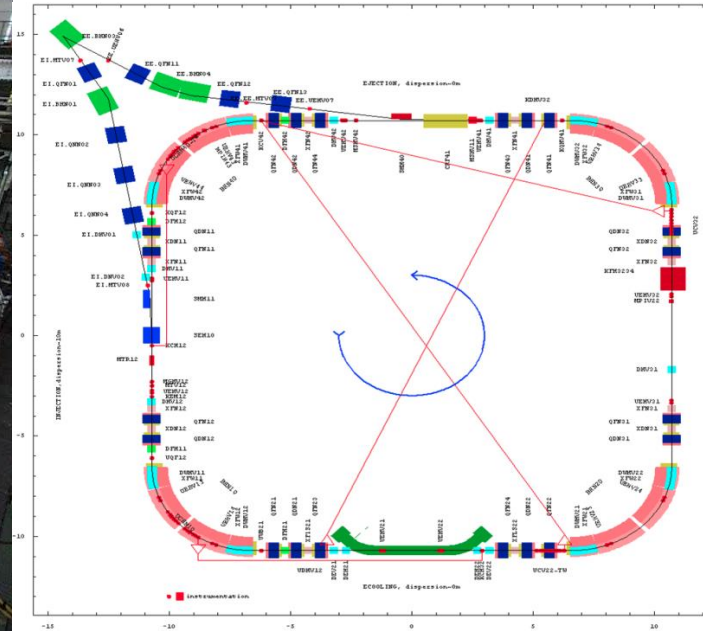
- Varje varv passerar partiklarna samma RF-kavitet (E-fält) och accelereras mer
  - Måste vara i fas med det acclererande fältet => Gruppering, "bunch"-struktur
- Strålen styrs runt banan av magneter (B-fält)
  - Magnetfälten ökas synkront med partiklarnas energi, så att strålbanan inte ändras





# LEIR – en liten synkrotron på CERN

Ca 75 m omkrets, accelererer blyjoner från 4.2 MeV to 72 MeV

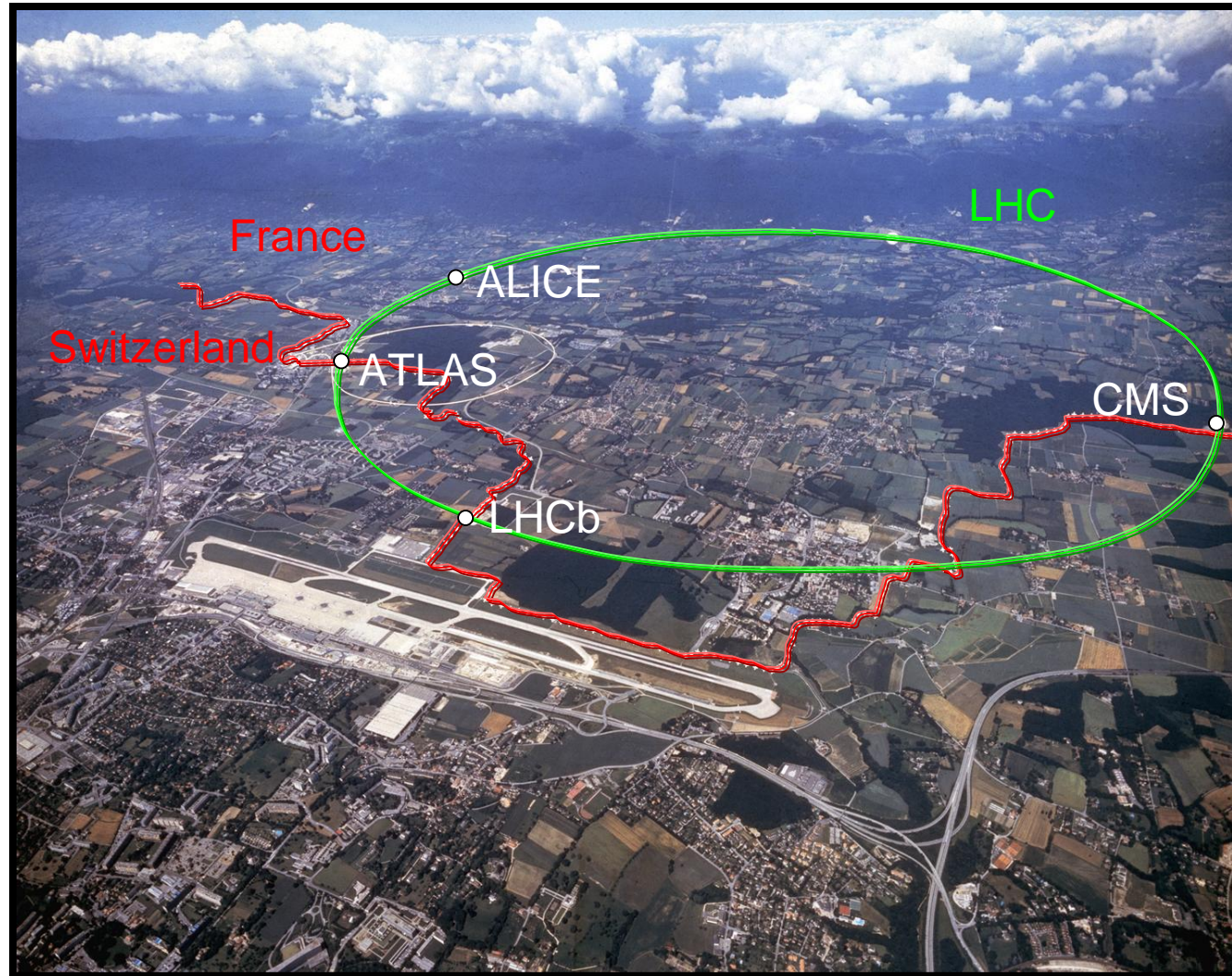






# LHC – en stor synchrotron

- 27 km lång, nästan 10000 magneter
- accelererar protoner från 450 GeV till 7 TeV
- Accelererar även blyjoner (upp till 2.76 TeV / nukleon)







# Magnettyper - Dipolen

Dipolmagnet, horisontell typ (vertikalt fält); Används för styrning av strålen runt i ringen.

Samma böj-kraft på alla partiklar

$$F_x = -ev_s B_y$$

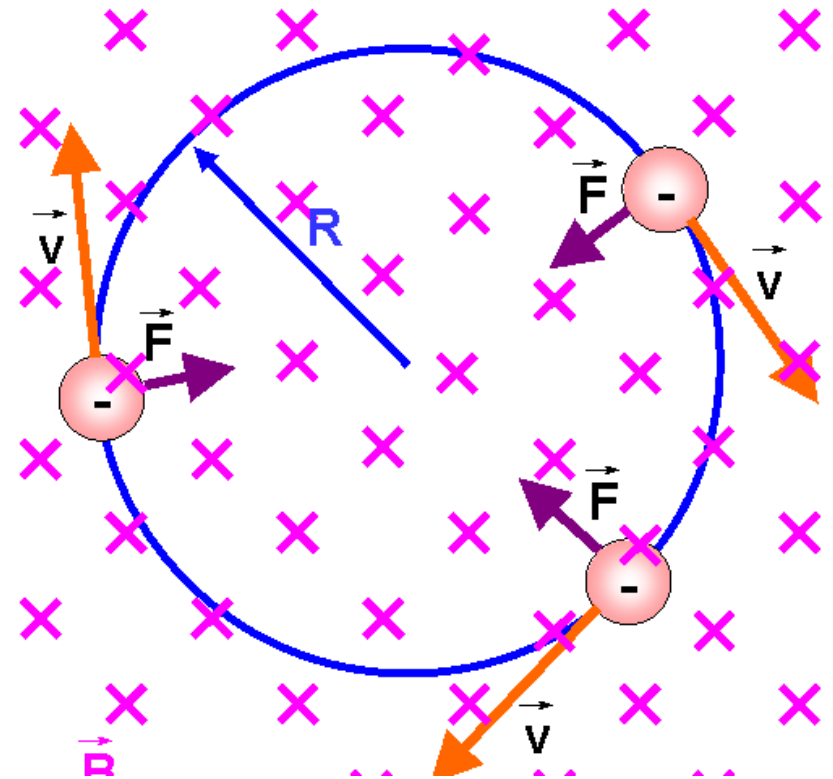
$$F_r = mv_s^2 / \rho$$

$$p = mv_s$$

$$\frac{1}{\rho(x, y, s)} = \frac{e}{p} B_y(x, y, s)$$

$$B\rho = \frac{p}{e}$$

Magnetisk styvhet  
"Magnetic rigidity"



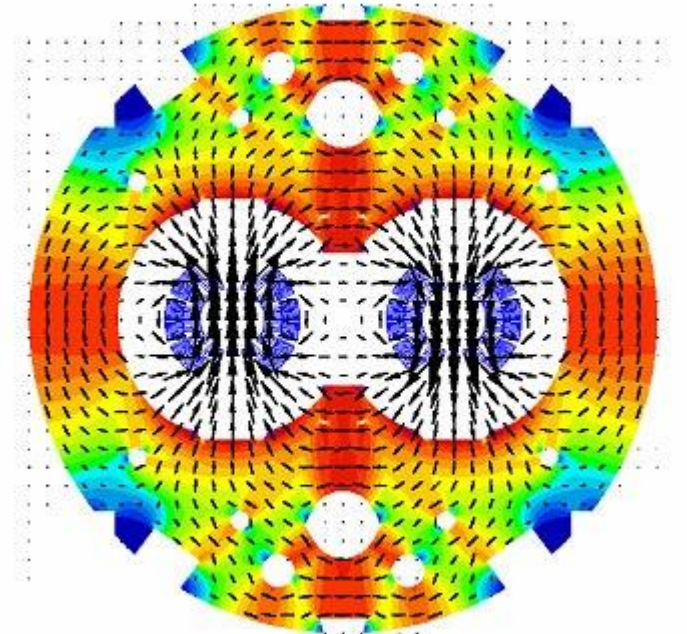
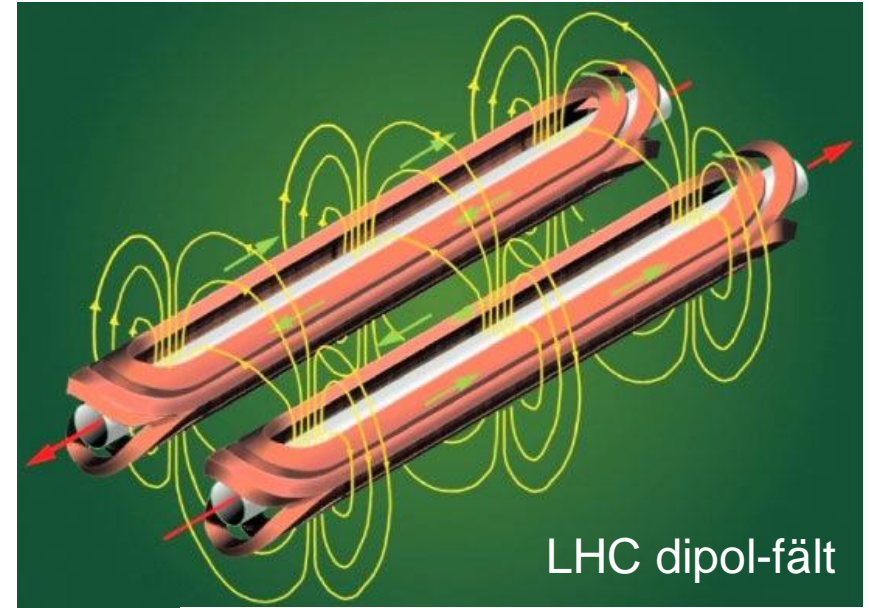
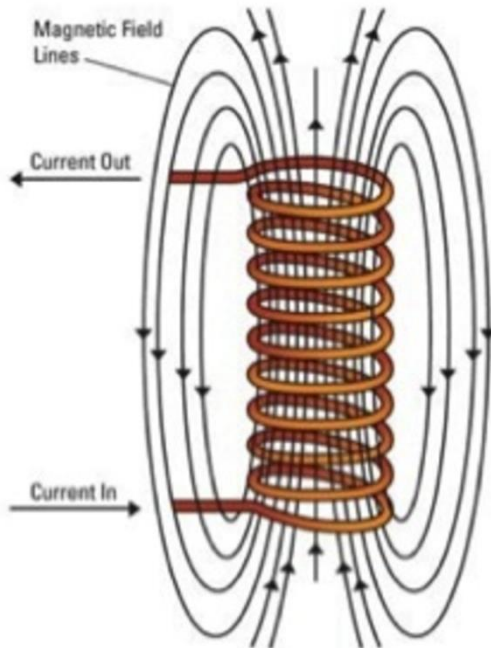


# Hur man gör en dipolmagnet

Ström genom spole skapar vertikalt fält

Gör spolen låg och lång

Sätt två spolar ovanpå varann och låt partiklarna gå emellan





# PS Dipol – 1956....



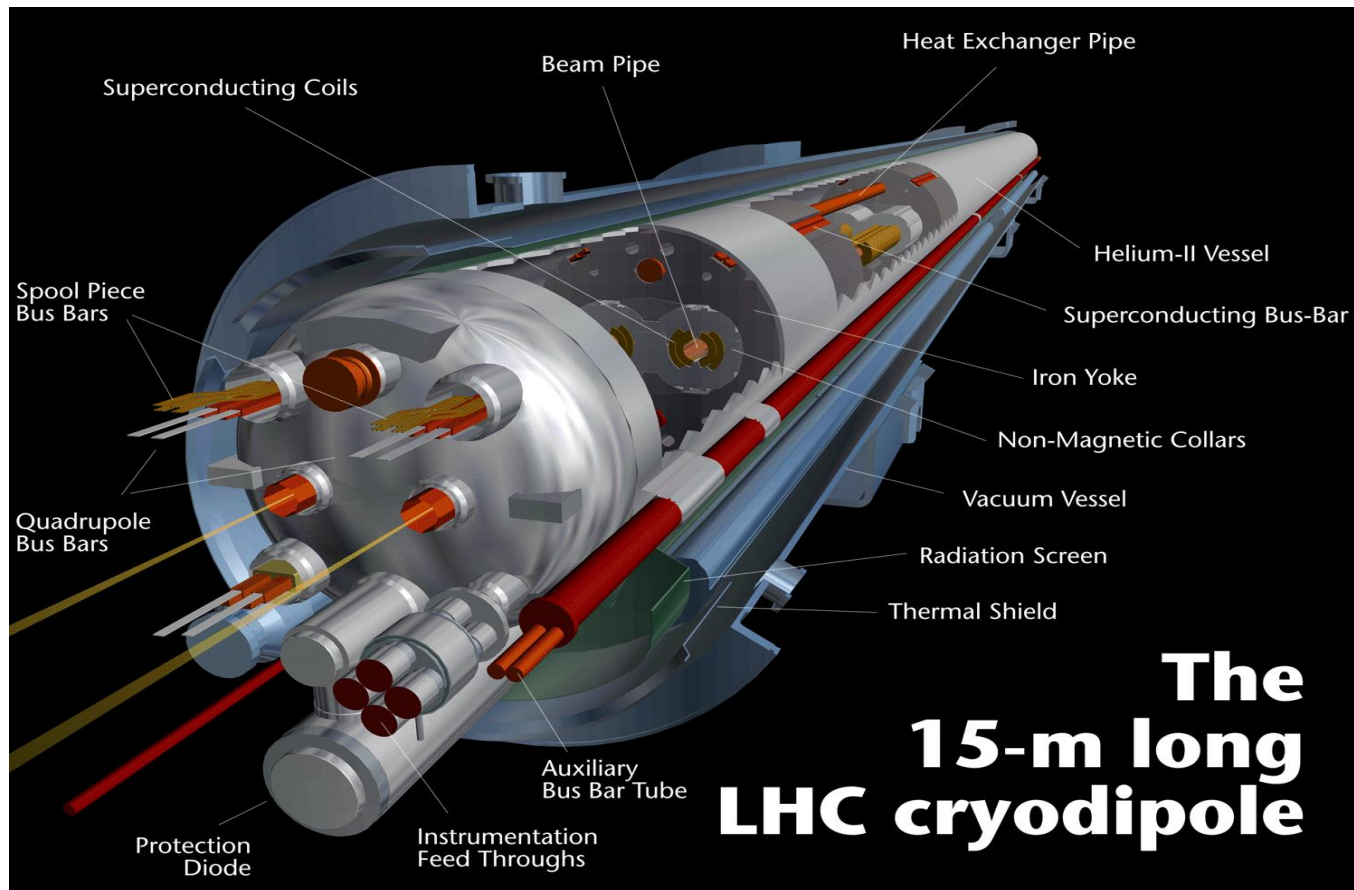




# Supraledande Dipol för LHC-2008

LHC dipolen (15m/30 ton - 1232 stycken installerade i tunneln)  
Bygga i 3 fabriker (Tyskland Frankrike, Italien)

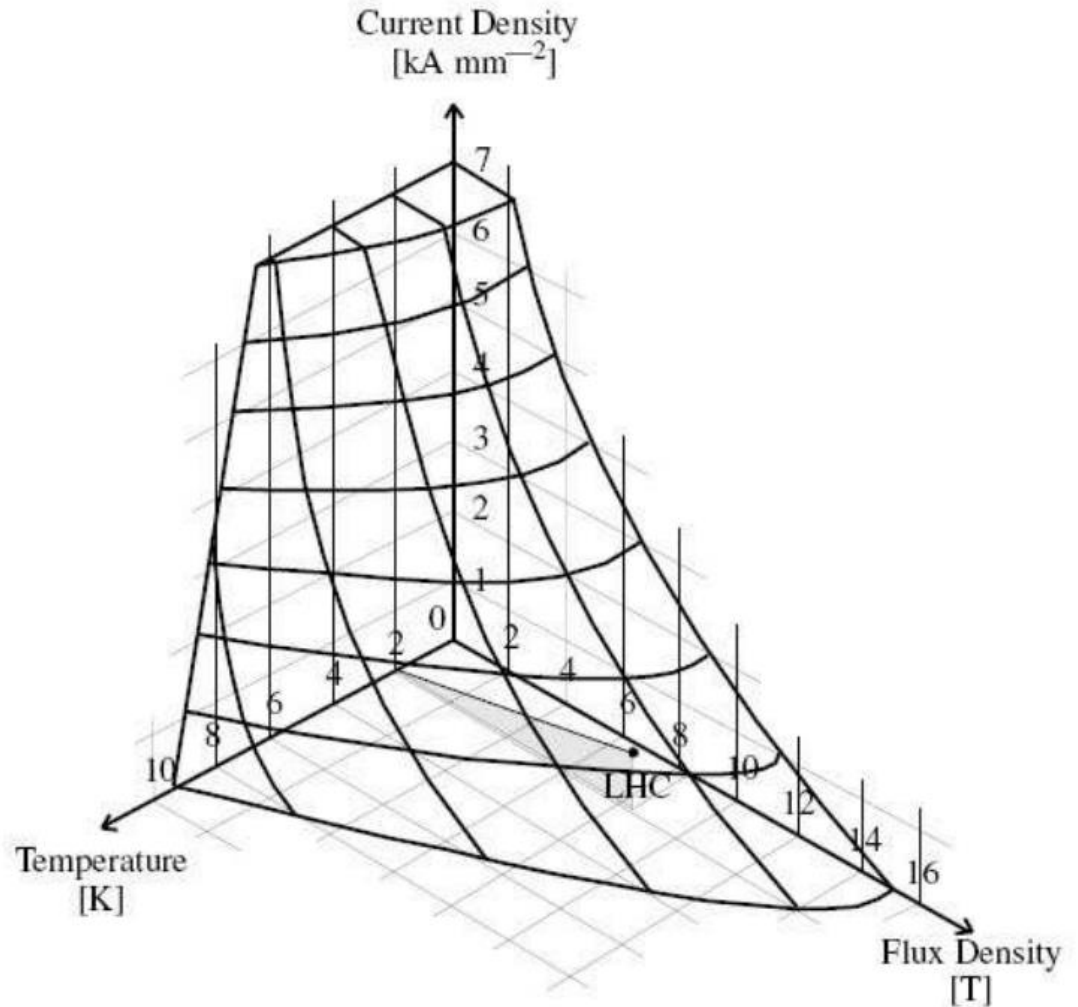
TEKNOLOGI





# Supraledande magneter

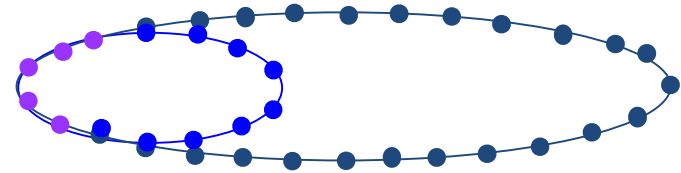
- LHC använder supraledande magneter
- Leder ström utan motstånd
  - NbTi nerkylt till 1.9 K
- Flytande helium används som kylmedel
- “Quench” om arbetspunkten hamnar utanför en given yta (i magnetfält B, ström I och temperatur T)





# Varför Supraledande Teknologi

- LHC använder supraledande magneter. Varför?
- Liten radie, mindre maskin. Kan ej få lika högt B-fält med normalledande magneter..
- Stor energibesparing, men infrastrukturen mycket mer komplex.

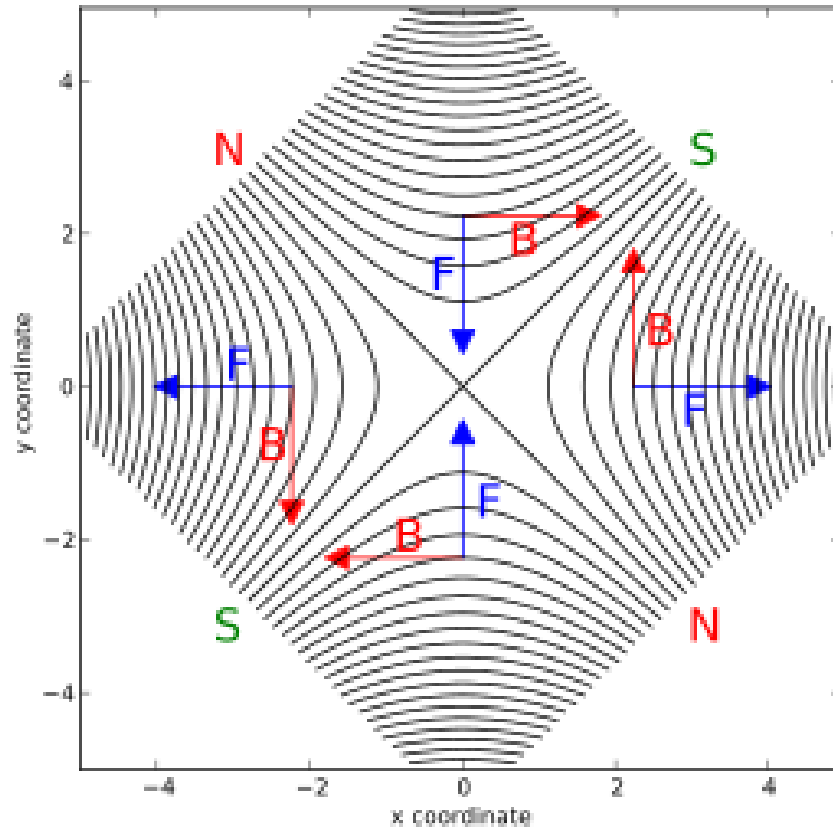


Kylskåp- XXXL.



# Magnettyper - kvadrupolen

Partiklarna måste fokuseras för stanna kvar i maskinen och för att kunna accelereras. Linser, i form av kvadrupoler, precis som i vanliga optiska system används.

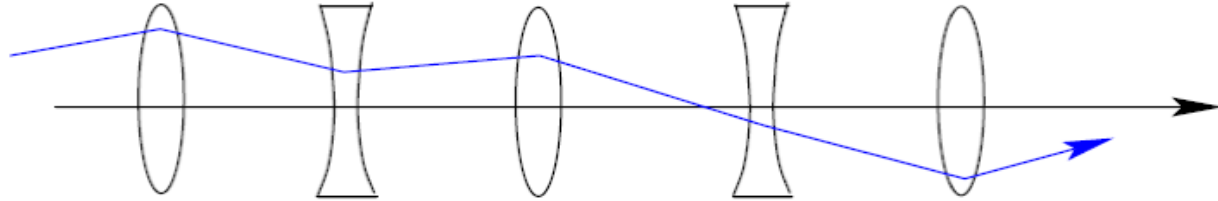


Partiklar längre bort från magnetcentrum böjs av mer, de korrigeras hårdare

Positiv partikel som rör sig in i planet:

- Inget magnetfält i origo => ingen kraft på partiklar som är där de ska vara
- Fokuserande i vertikala planet: magnetfältet och kraften proportionella mot avståndet från origo
- Defokuserande i det horisontella planet: magnetfältet och kraften proportionella mot avståndet från origo

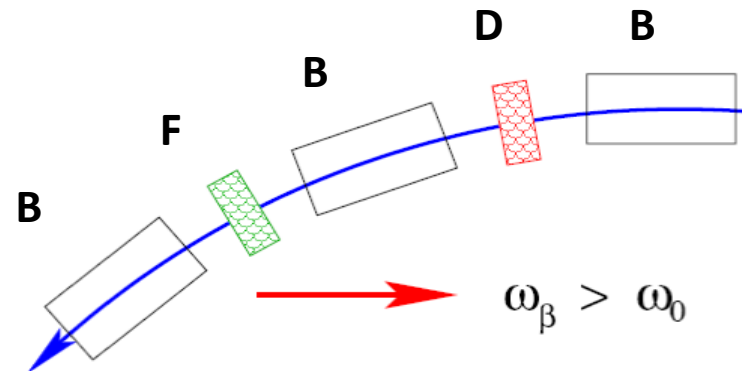
# Fokuseringsystemet



“ Alternate gradient focusing ” ger totalt fokuserande effekt (jämför optiska system i kameror t.ex.). Utvecklad av Brookhaven i AGS maskinen i slutet av 1950 talet.

Strålen tar mindre plats i vakumröret (amplituderna blir mindre), magnetfältet kan göras homogenera genom att magnetgapet blir mindre.

Magnettyperna i linssystemet alterneras mellan fokuserande och defokuserande linser i de olika Planen.







# Partiklars rörelse i kvadrupolmagneter

Kraften är proportionell mot avståndet från origo: Jämför massa som hänger i en fjäder

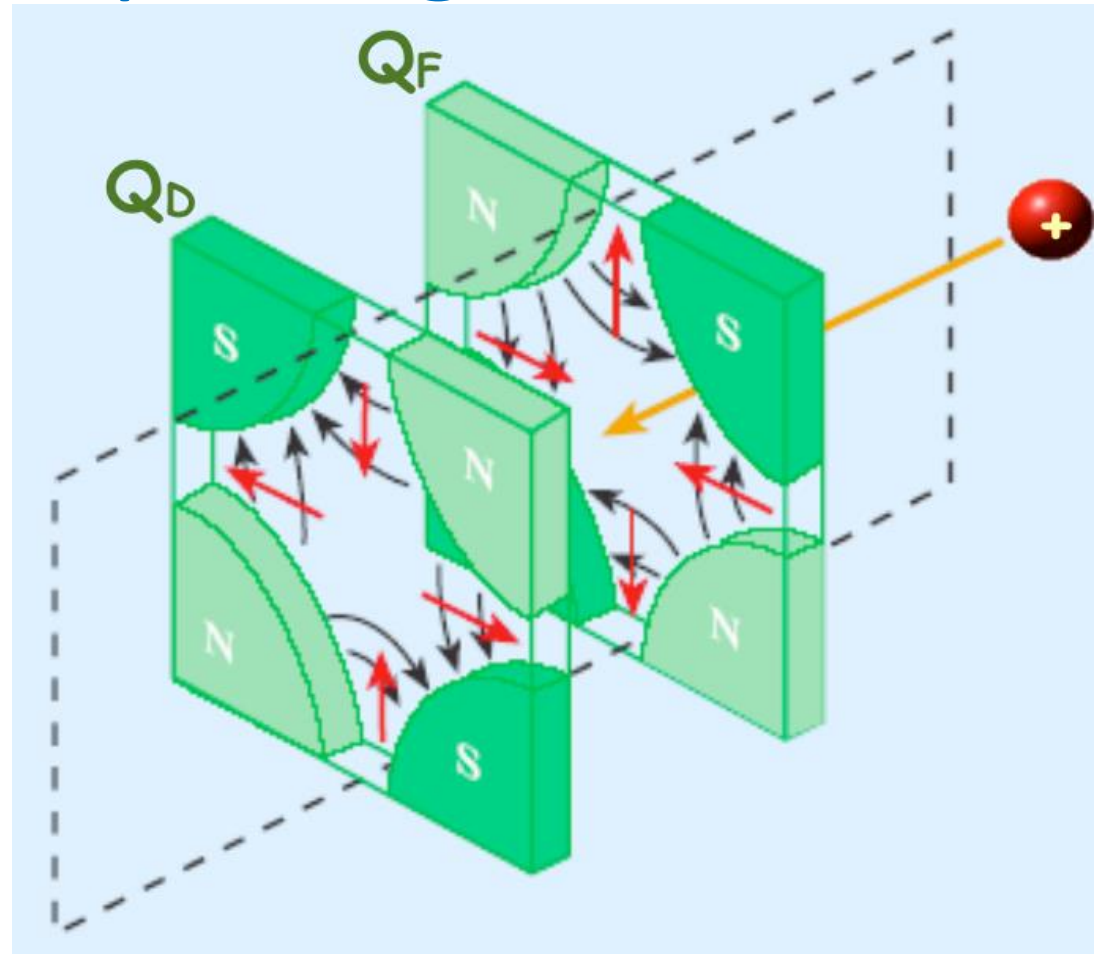
$$X''(s) = -K X(s)$$
$$X(s) = A \cos(\sqrt{K} s + \varphi)$$

I det plan där partiklar fokuseras: Sinus-formad svängning runt den centrala banan

I det plan där partiklarna defokuseras: byt tecken på K:

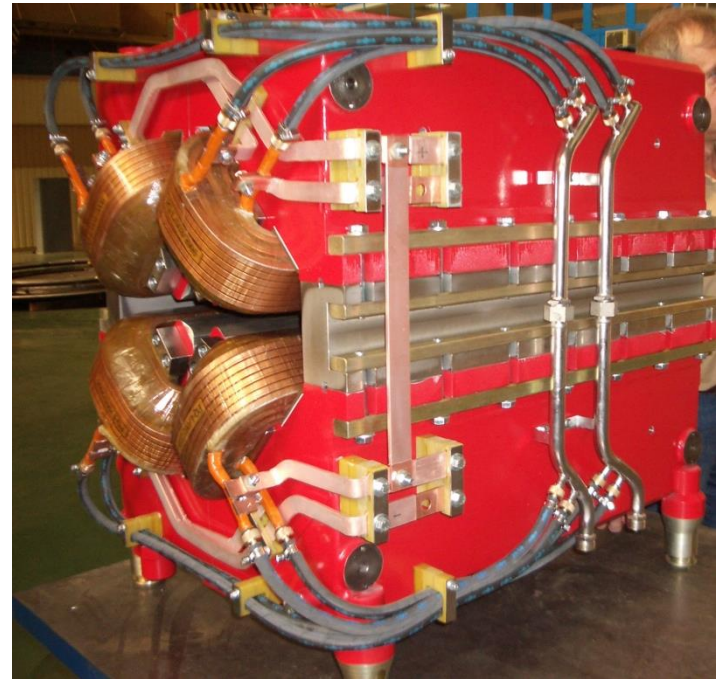
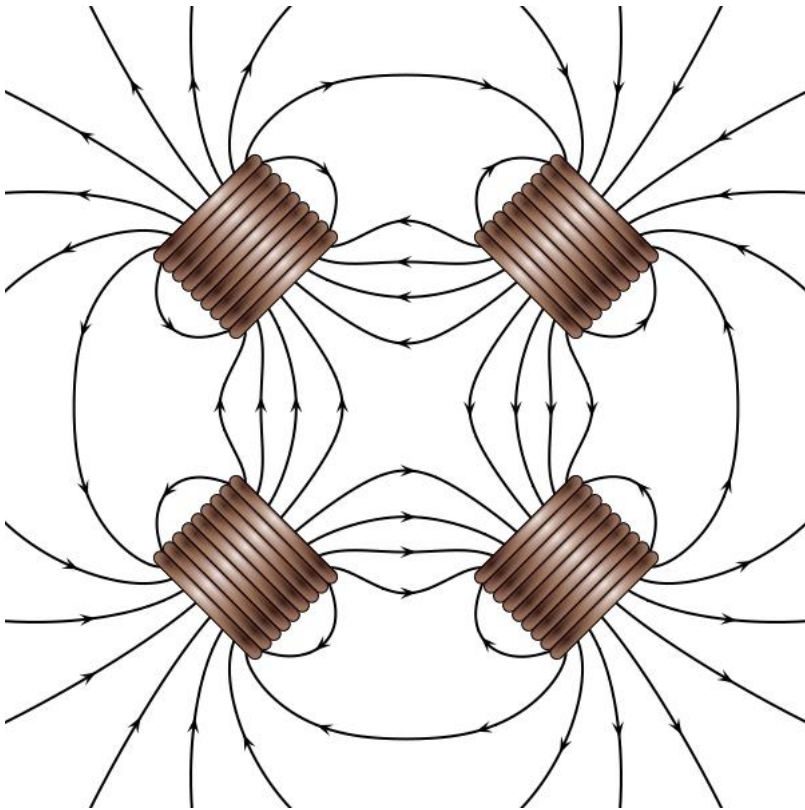
$$X''(s) = K X(s)$$
$$X(s) = A e^{\sqrt{K} s + \varphi}$$

Exponentiell avböjning från centrum



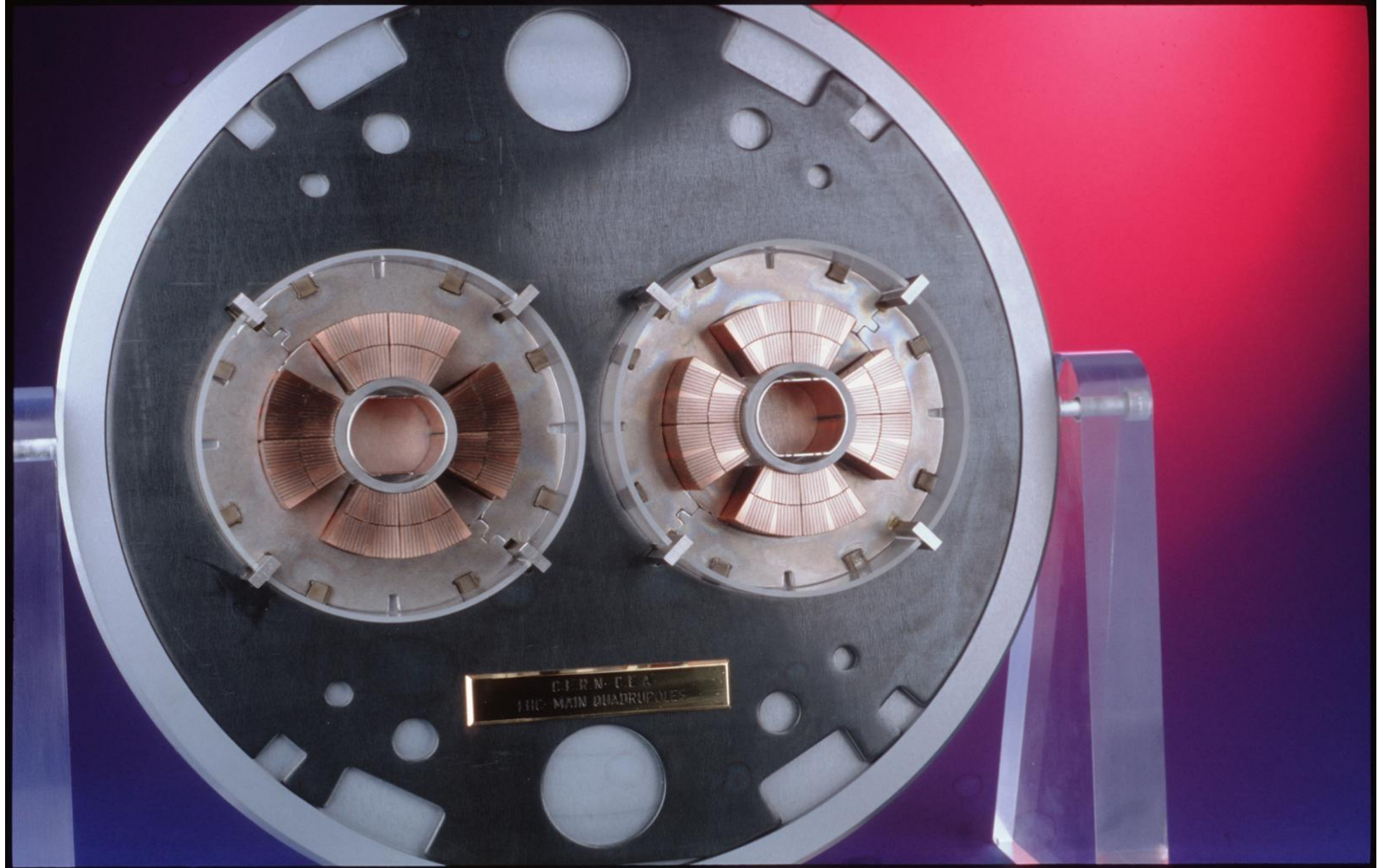
# Kvadrupol-magneter

Använd fyra spolar...





# LHC supraledande kvadrupol - tvärsnitt 2008 5.3m/6.5 ton





# LHC Kvadrupol 2009





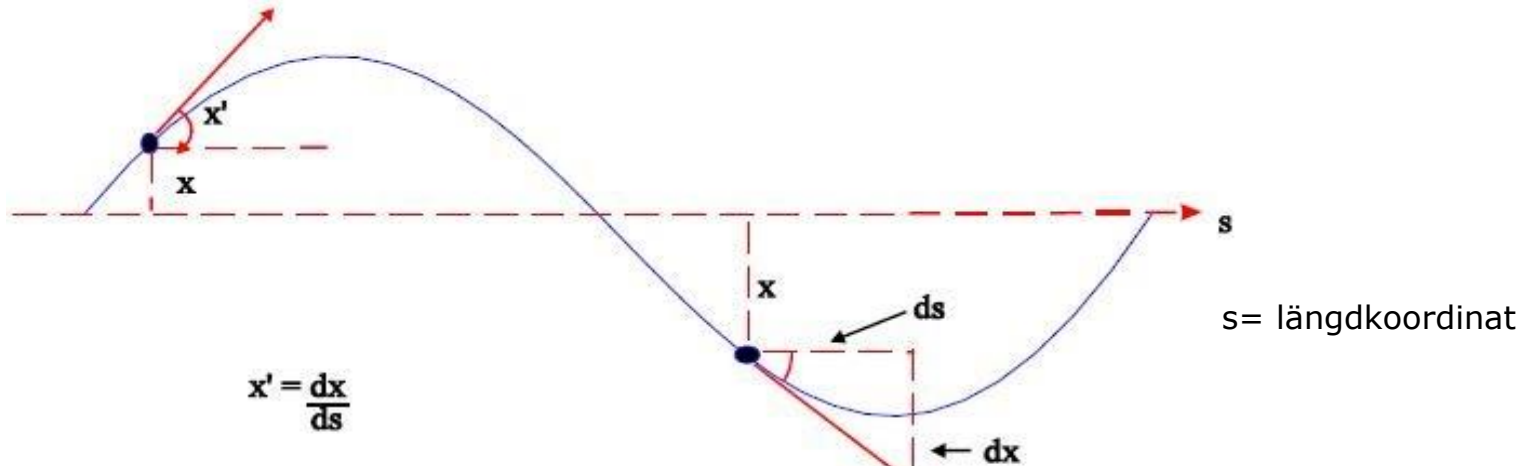


# LHC Kvadrupol 2009





# Partikelns position och vinkel runt maskinen



Partikelns position - karakteriserad av:  $(x(s)), (x'(s))$ . Oscillation(t)  $\rightarrow$  Oscillation(s)!  
 Rörelseekvation (Hills ekvation):

$$X''(s) = -K(s) X(s)$$

$K(s)$  är återföringskraften genererad av magnetfälten;  $K$  beror nu av  $s$  och beskriver både dipoler, kvadrupoler, drift etc.

Allmän lösning kan skrivas som  $X(s) = \sqrt{\varepsilon \beta(s)} \cos(\mu(s) + \varphi)$

$\varepsilon$  = enpartikel-emittans, konstant och beroende av initialvillkoren.

$\varphi$  = fas, konstant och beroende av initialvillkoren

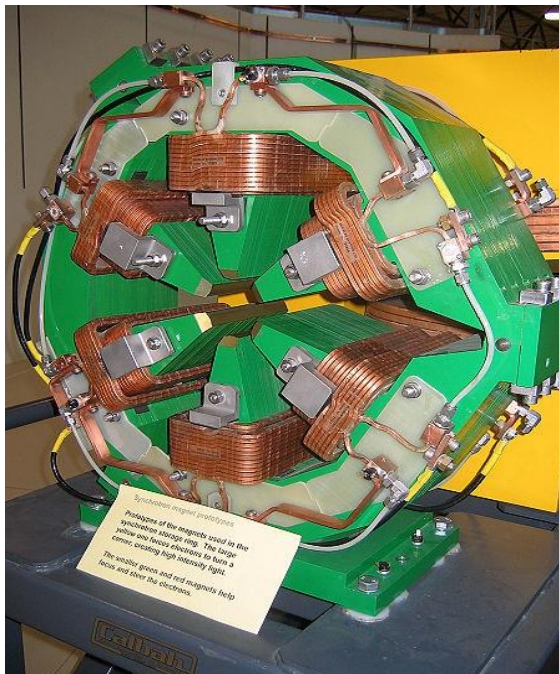
$\beta(s)$  = amplitud-modulering är en funktion av fokuseringstyrkan

$\mu(s)$  = fasen är en funktion av fokuseringstyrkan

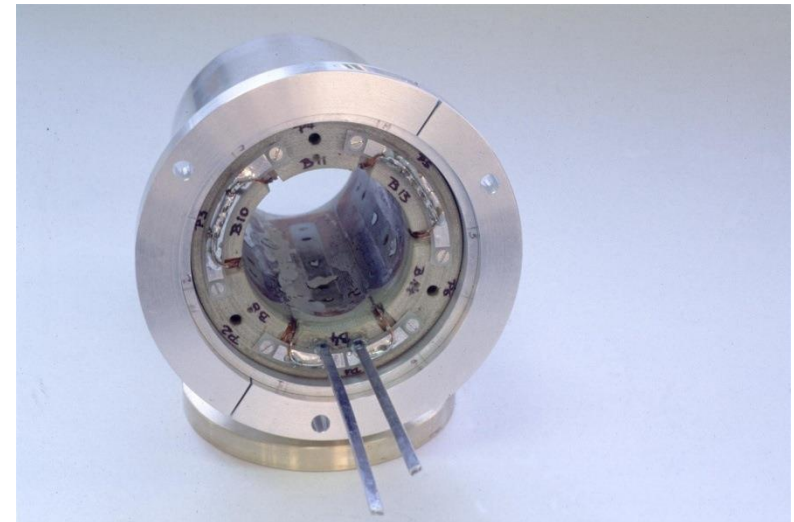


# Högre ordningens magneter

Dipoler och kvadrupol-magneter styr partiklar med olika energier olika, en egenskap som kallas kromaticitet i analogi med optiken. Energispridningen som är inneboende i en partikelstråle ger upphov till en spridning av fokuseringen och till instabiliteter. Sextupol magneter (och högre ordningars magneter ) används för att korrigera fenomenet men dessa ger också upphov till andra icke önskvärda icke linjära rörelser.



wikipedia

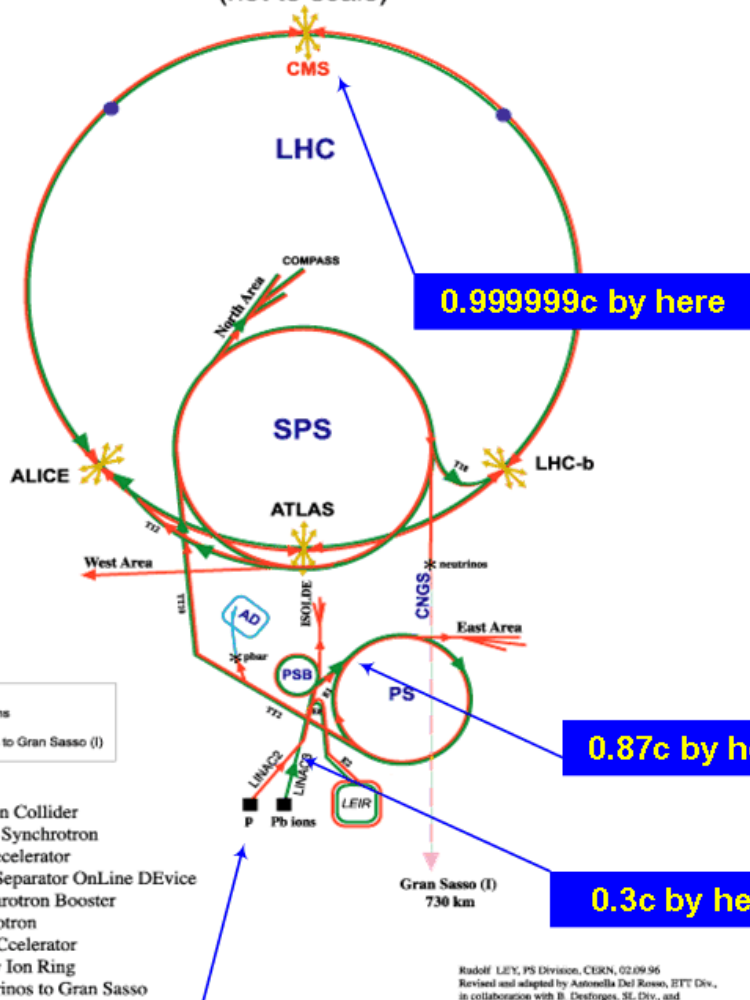






# Acceleratorerna på CERN

CERN Accelerators  
(not to scale)



- Kedja av accelerators – var och en har sitt speciella energi-intervall
- Svårt/omöjligt att bygga en enda accelerator som spänner över hela energiskalan
- LHC är sist och störst

## Energier:

Linac 50 MeV

PSB 1.4 GeV

PS 28 GeV

SPS 450 GeV

LHC 7 TeV

Start the protons out here

0.999999c by here

0.87c by here

0.3c by here

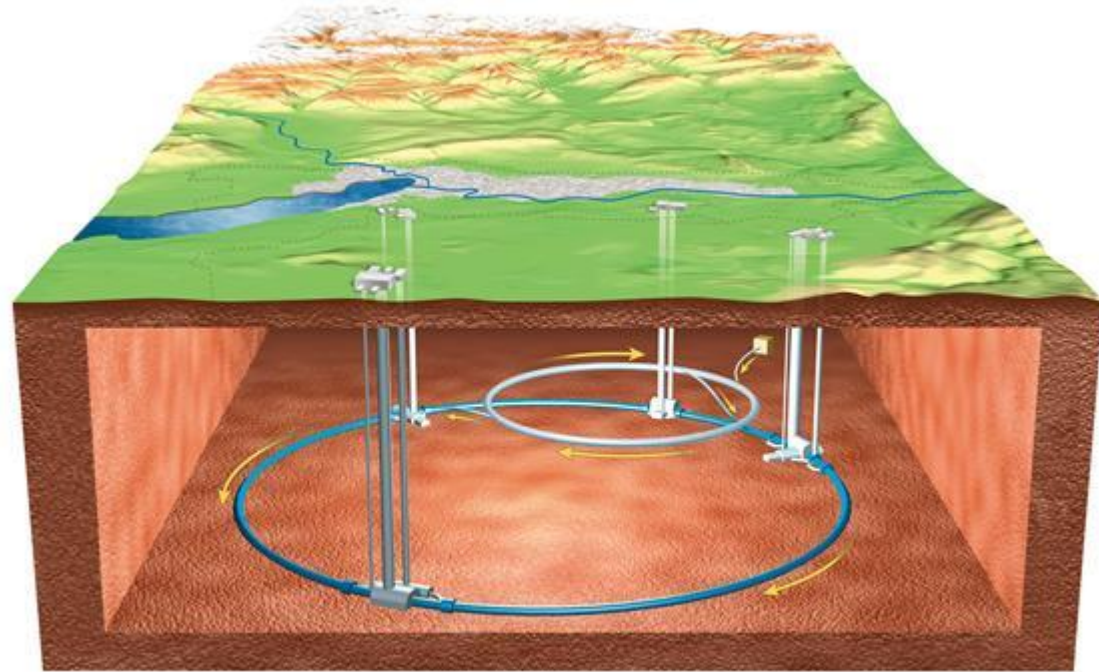
Radolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96  
Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,  
in collaboration with B. Destogres, SL Div., and  
D. Manglani, PS Div, CERN, 23.05.01





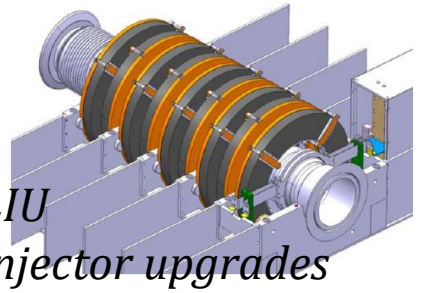
# LHC

- Design påbörjad på 80-talet, godkänd 1995
- Största accelerator/kolliderare (lika stor som LEP) och högsta energin någonsin
- 27 km lång, bygd i den gamla LEP-tunneln
- 100m under jord
- Ska kunna krocka
  - 7 TeV protoner (har klarat 6.8 TeV hittills)
  - 0.57 PeV  $\text{Pb}^{82+}$  (fully stripped ions)





# Tidslinje för LHC



LIU injector upgrades

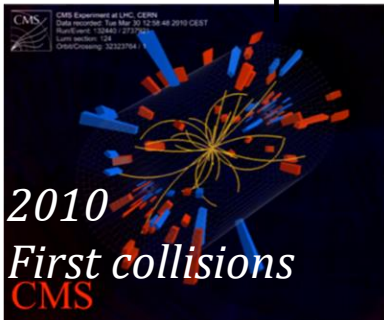
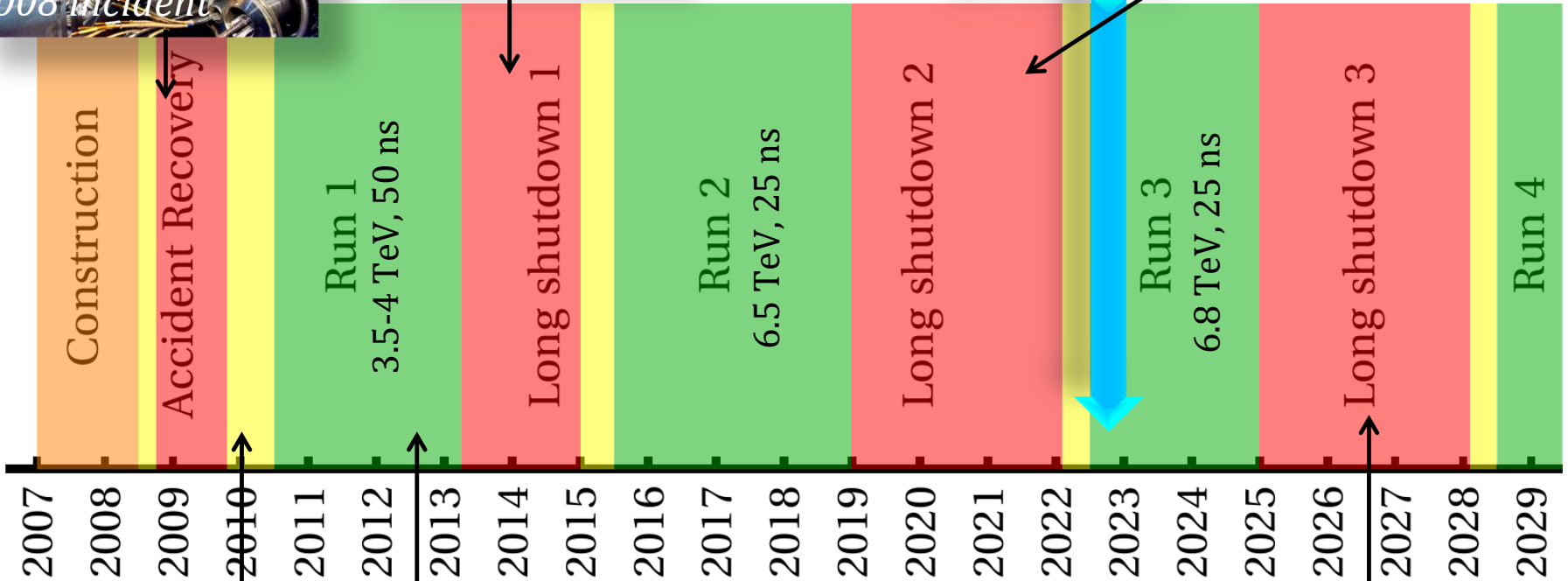
We are here



2008 incident



Splice repairs



2010 First collisions CMS



2012 Higgs discovery



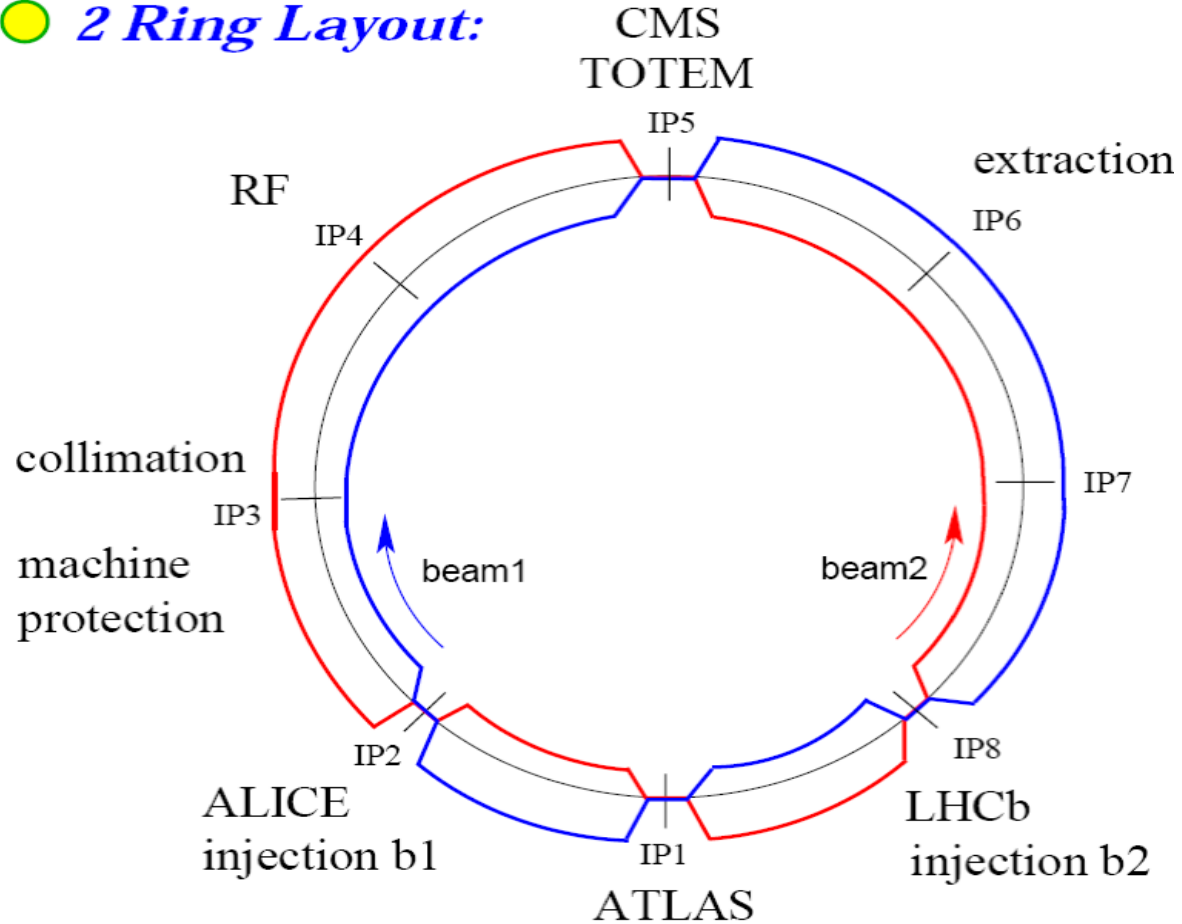
HL-LHC installation



# LHC Layout

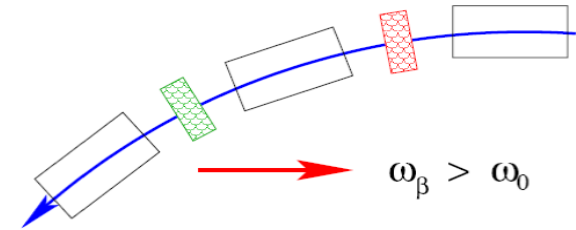
- 8 böjar, 8 kortare raksträckor
- På 4 av raksträckorna: experimentella detektorer där partiklarna kolliderar
  - ATLAS, CMS, ALICE, LHCb
- På de andra 4 raksträckorna:
  - RF för acceleration
  - Kollimering (maskinskydd)
  - Extraktion

## ● *2 Ring Layout:*

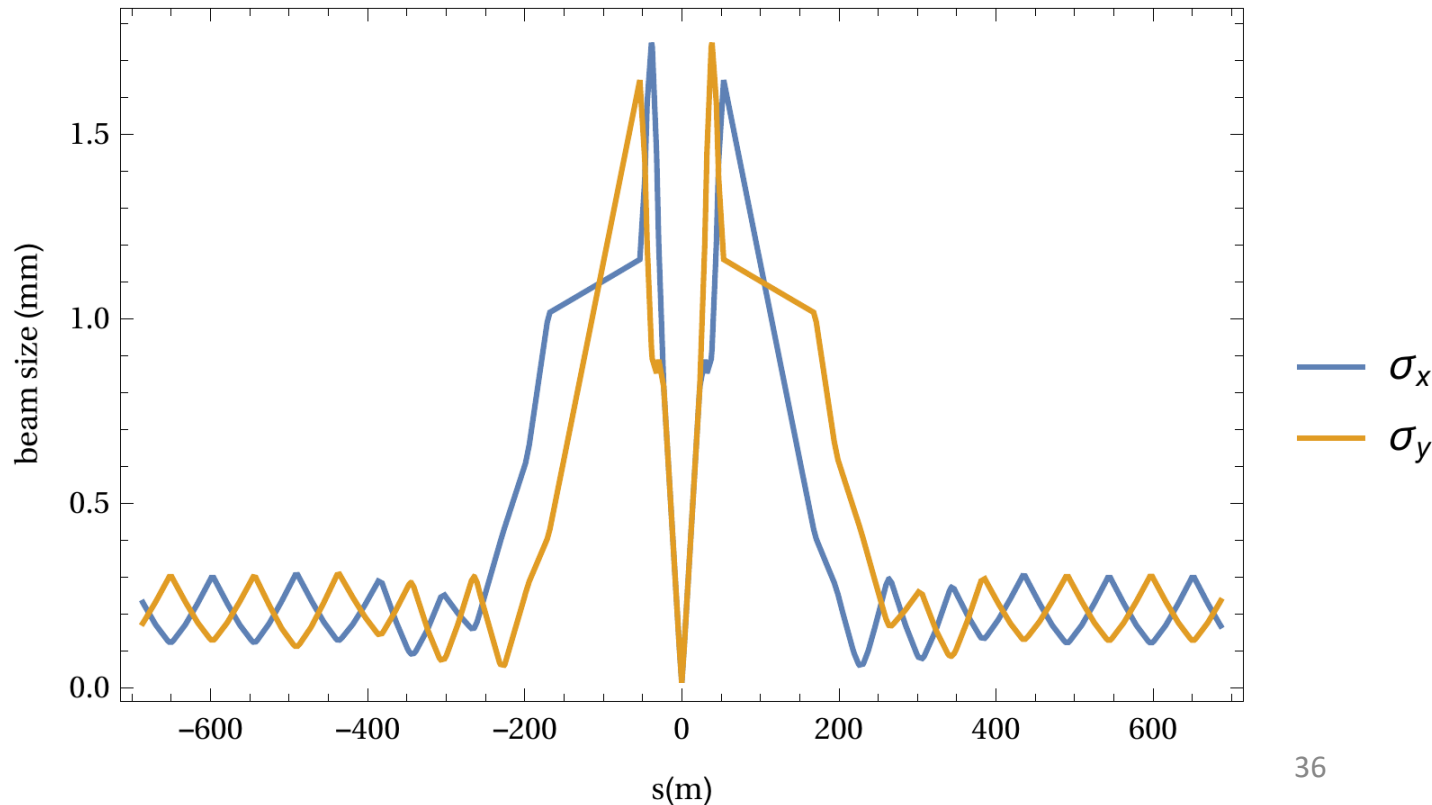


# LHC lattice

- I böjarna: periodisk layout av dipoler med fokuserande och defokuserande kvadrupoler
- I kollisionspunkterna: Strålstorleken fokuseras ner till väldigt liten storlek (2012: ca  $10\ \mu\text{m}$ )



- För att öka antalet kollisioner
- För att uppnå detta: strålen “blåses upp” precis innan

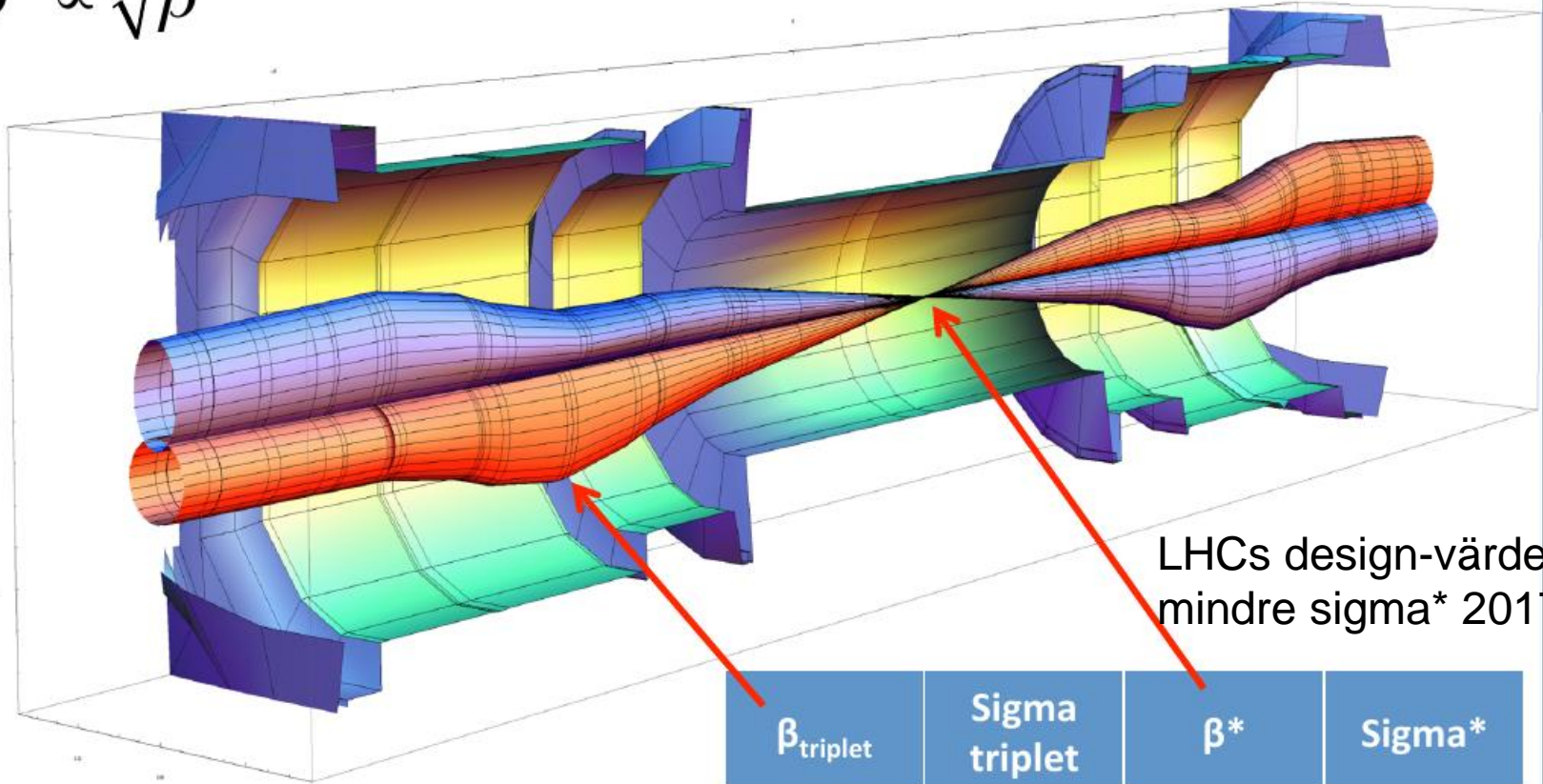






# Strålb Manor i 3D runt kollisionspunkten

$$\sigma^* \propto \sqrt{\beta^*}$$



LHCs design-värden –  
mindre sigma\* 2017

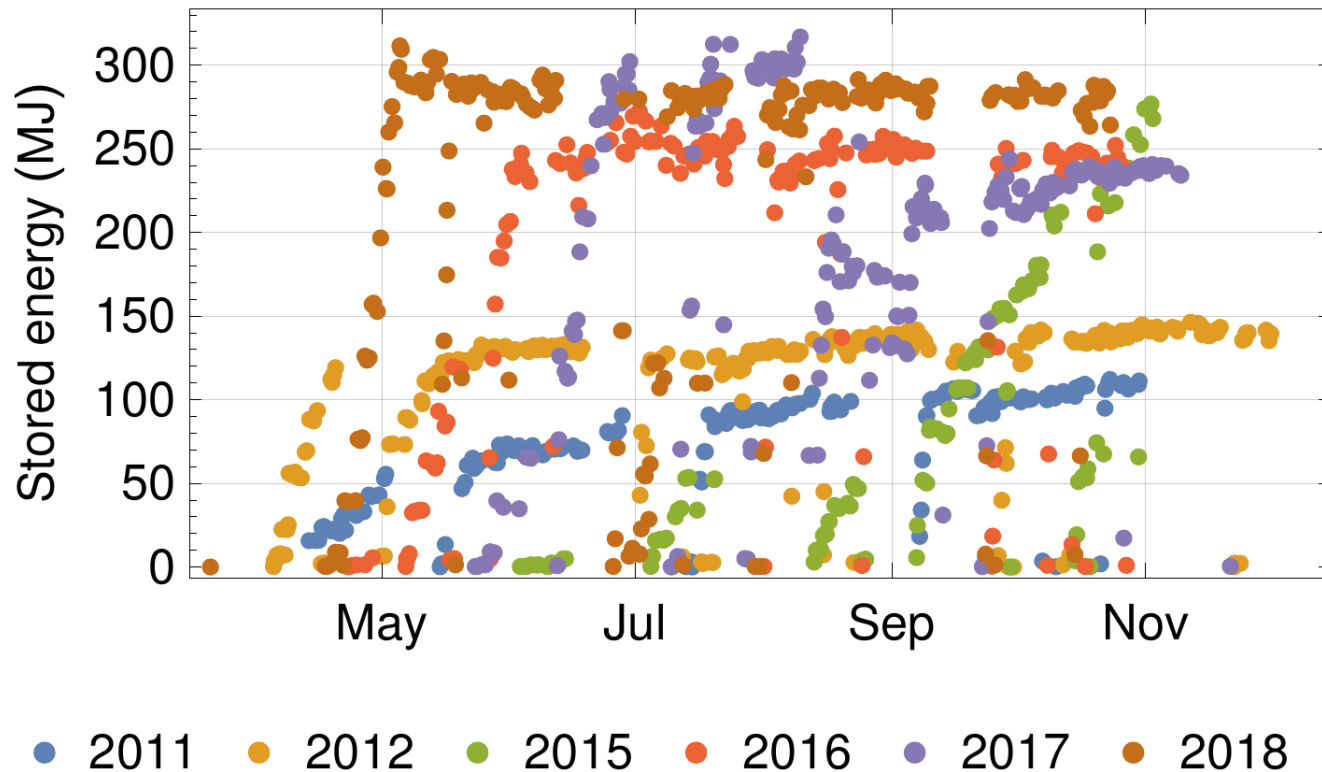
$\beta_{\text{triplet}}$	Sigma triplet	$\beta^*$	Sigma*
~4.5 km	1.5 mm	55 cm	17 $\mu\text{m}$

Image courtesy John Jowett



# Utmaning: Maskinskydd

- Total lagrad energi i LHCs stråle: upp till ca 300 MJ
- Om strålen inte kontrolleras väl => strålförluster (protoner “åker in i väggen”) - kan göra enorm skada



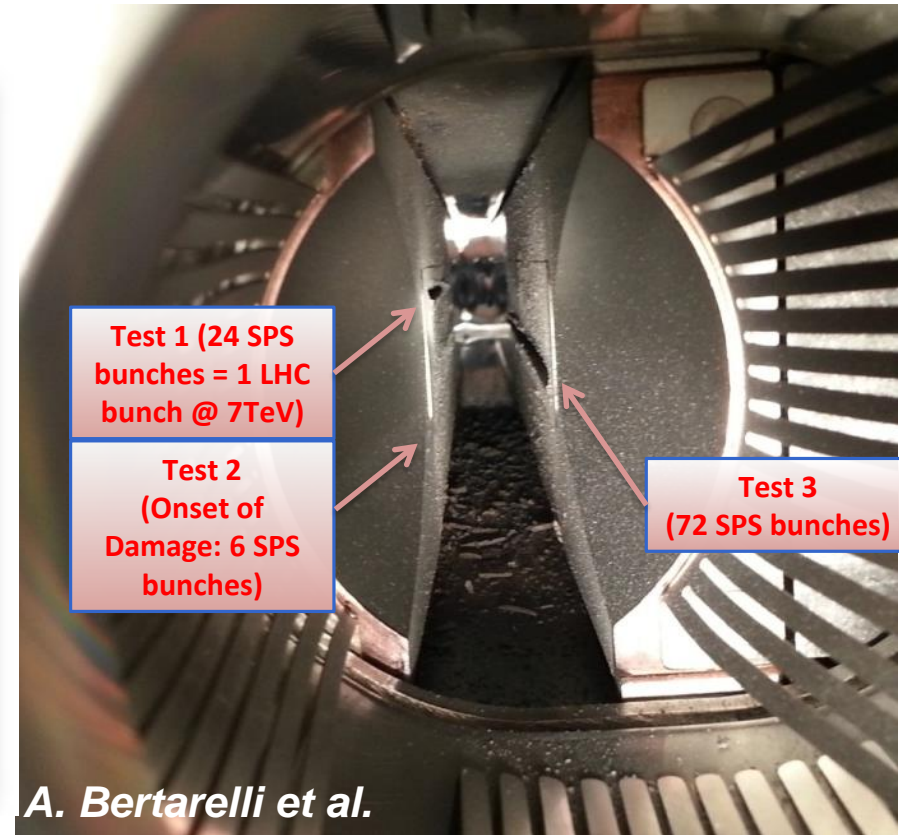
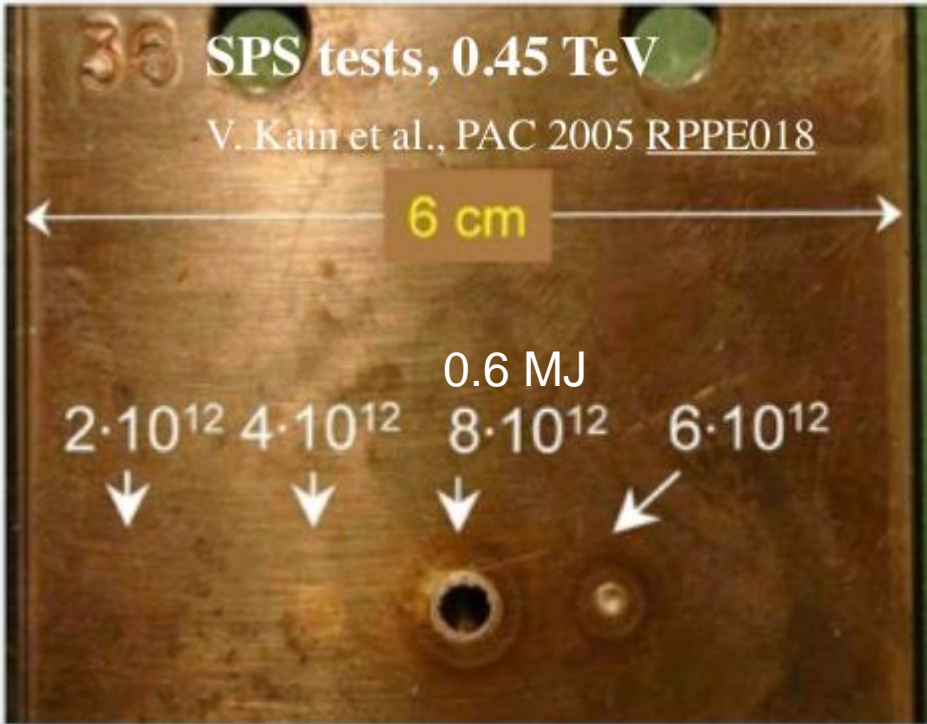


# 300 MJ ...

- 300 MJ kan smälta ca 400 kg koppar
- 300 MJ är rörelseenergin för ett X2000-tåg i ca 155 km/h
- I LHC: samma rörelseenergi i en 200  $\mu\text{m}$  bred protonstråle



# Effekt av strålförluster

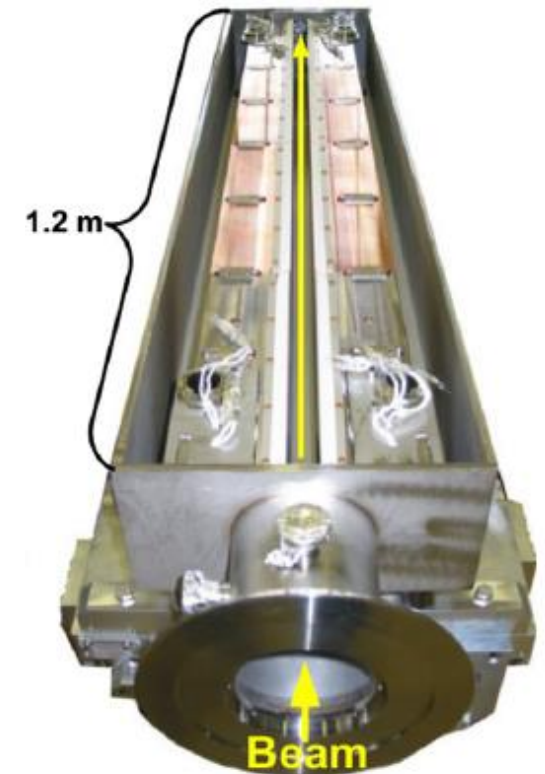


- Endast ett fåtal LHC-buncher kan göra hål i koppar (t.v.) och wolfram (t.h)
- I hela ringen finns ca 2500 buncher... (2018)
- Måste lita på att strålen kan dumpas innan alltför stora förluster inträffar i ringen



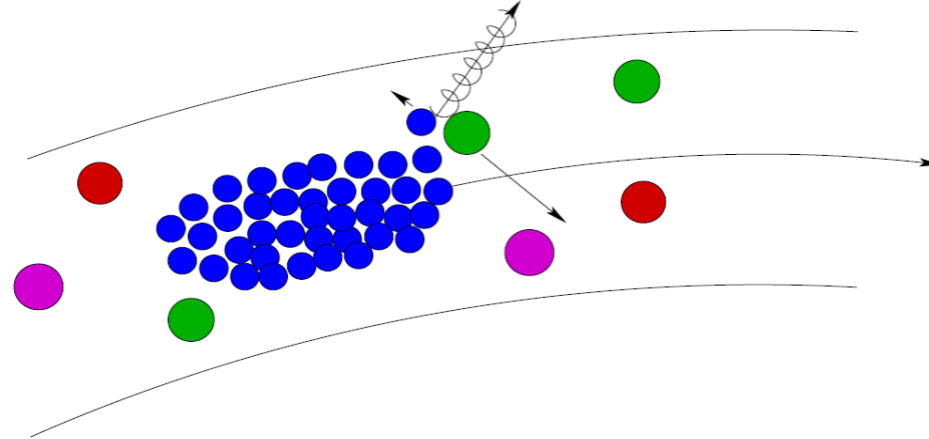
# Kollimatorer

- Ca 100 kollimatorer ska skydda LHC från farliga strålförluster
- Varje kollimator består av två rörliga block av främst kol (carbon-fiber-compisite) eller wolfram, som säkert ska fånga upp eventuella förluster



300 MJ,  
2.2 mm full gap<sup>41</sup>

## Bremsstrahlung + Coulomb Scattering

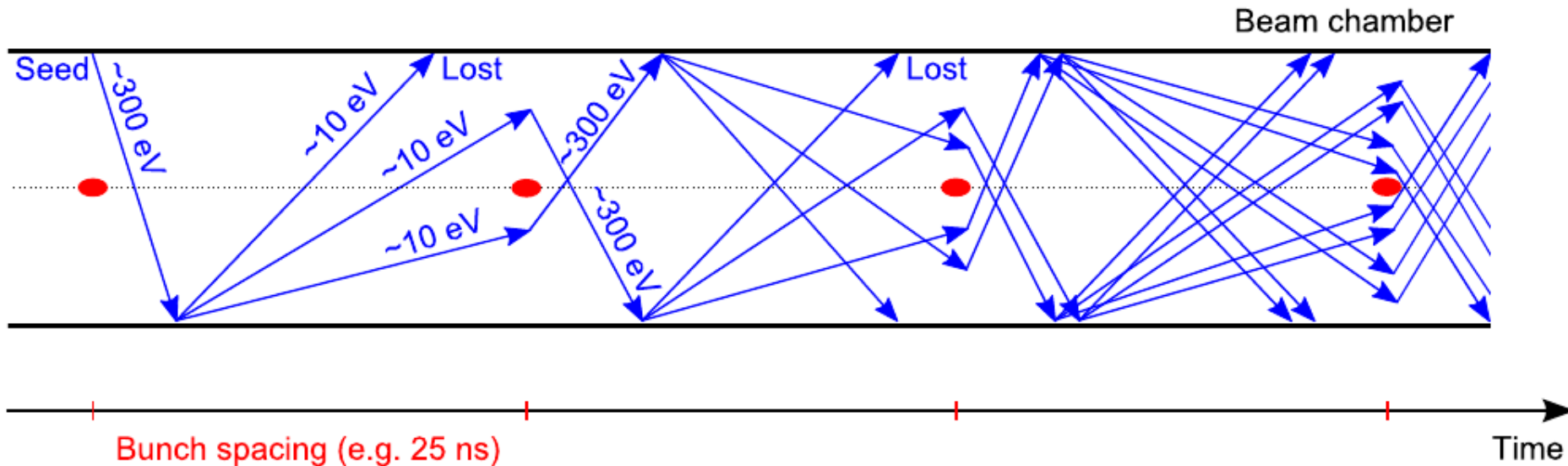


- Förstoring "Blow up" av strålen
  - Partikelförluster
  - Önskade kollisioner i experimenten
  - Minskad luminositet
- 
- LHC :
  - Ultrahögt vacuum  $10^{-13}$  Torr ( $\sim 3$  million molekyler/cm<sup>3</sup>)
  - 1 Atmosfär = 760 Torr



# Electron cloud – “elektron-moln”

- Elektroner i vacuum-pipan accelereras av bunchens elektriska fält
- Elektronerna träffar insidan av strålpipan, där ytterligare elektroner frigörs => kaskadeffekt med fler och fler elektroner
- Leder till upphettning av strålröret, instabiliteter, sämre vacuum...
- En av LHCs största utmaningar för att öka antalet buncher





# Ytterligare utmaningar

Typer av avvikelser som kan inverka menligt på strålkvaliteten.

Rörelser i jordskorpan

Tåg

Månen

Årstider

Byggnation

...

Magneterna måste kalibreras

Strömreglering i magneterna

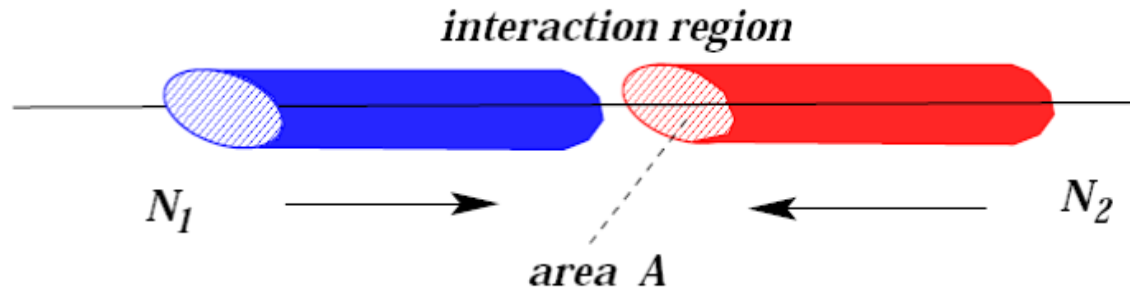
...

Energin hos partiklarna måste svara mot magnetfältens styrkor  
för att ha avsedda banor





# Mått på Colliderens prestanda: Luminositet



- (Antal kollisioner per sekund) = träffyta \* luminositet
- Träffytan (tvärsnittet) är given av naturen för varje fysikalisk process
- Luminositeten beror på acceleratoren: antal protoner per stråle samt strålstorleken
  - Strålen måste vara liten i kollisionspunkten
  - Begränsningar: magneternas fältstyrka samt deras öppning (apertur)



# Luminositet

*Intensitet*

Antal protoner per bunch

Omlopps-frekvens

Antal buncher

$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 f_{\text{rev}} k_B}{4\pi\beta^* \epsilon_{xy}} F$$

Geometrisk reduktionsfaktor  $\leq 1$

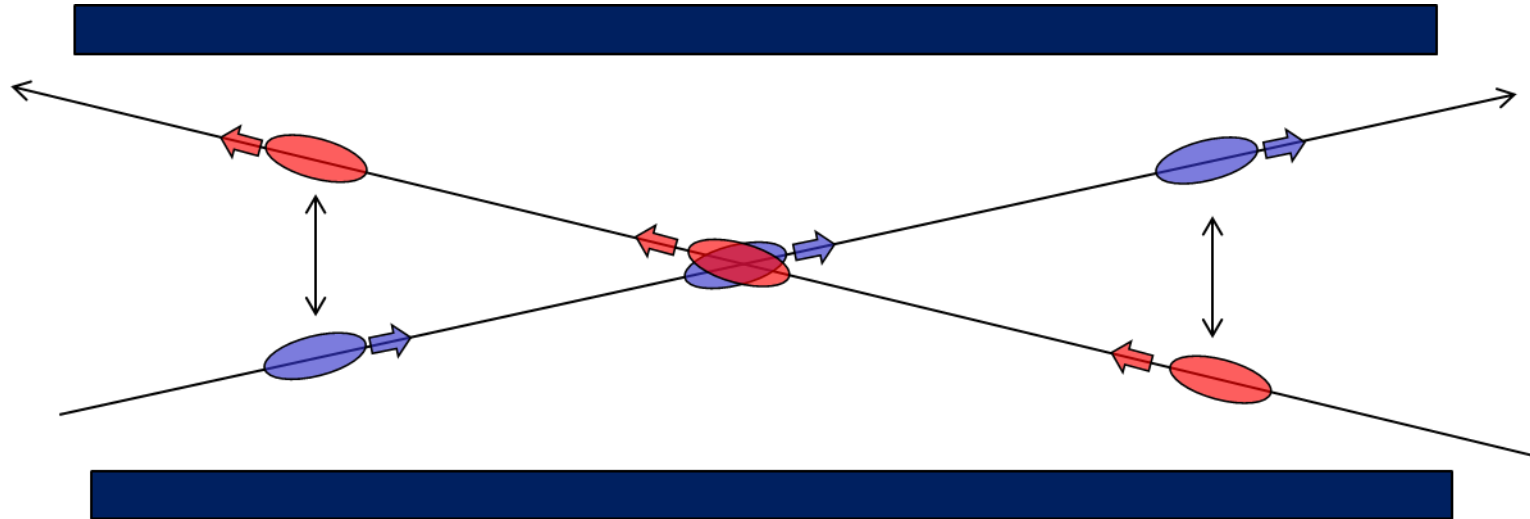
$$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_s \phi}{\sigma_x 2}\right)^2}}$$

*(Transversell Strålstorlek)<sup>2</sup>*

$\beta$ -funktion i krockpunkten

Emittans, konstant given av källa och injektorer

# Geometrisk reduktionsfaktor



- Buncherna måste ha en vinkel när de krockar
  - Annars blir det oönskade kollisioner
  - Vinkeln måste vara så stor så att buncherna inte störs av varandras elektromagnetiska fält (long-range beam-beam)
- Färre kollisioner när det inte är ett perfekt överlapp
- Geometrisk reduktionsfaktor beror på vinkelns storlek samt bunchernas längd

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_s \phi}{\sigma_x 2}\right)^2}}$$



# Operation av LHC

- **Injektion** av protoner vid 450 GeV
  - Ca 2500 buncher i varje stråle, ca  $1.1 \times 10^{11}$  protoner per bunch
- Acceleration (“**ramp**”) till 6.8 TeV
- “**Squeeze**”:  $\beta$ -funktionen i kollisionspunkterna görs mindre för ökad luminositet
- Strålbannorna ändras så att de kolliderar
- **Kollisioner** under åtskilliga timmar, antalet protoner minskar sakta
  - Ca 50 proton-kollisioner per bunch-kollision (“pileup”)
  - Ca  $2.5 \times 10^7$  bunch-kollisioner per sekund
- **Strålen dumpas**, cykeln börjar om med injektion av nya protoner

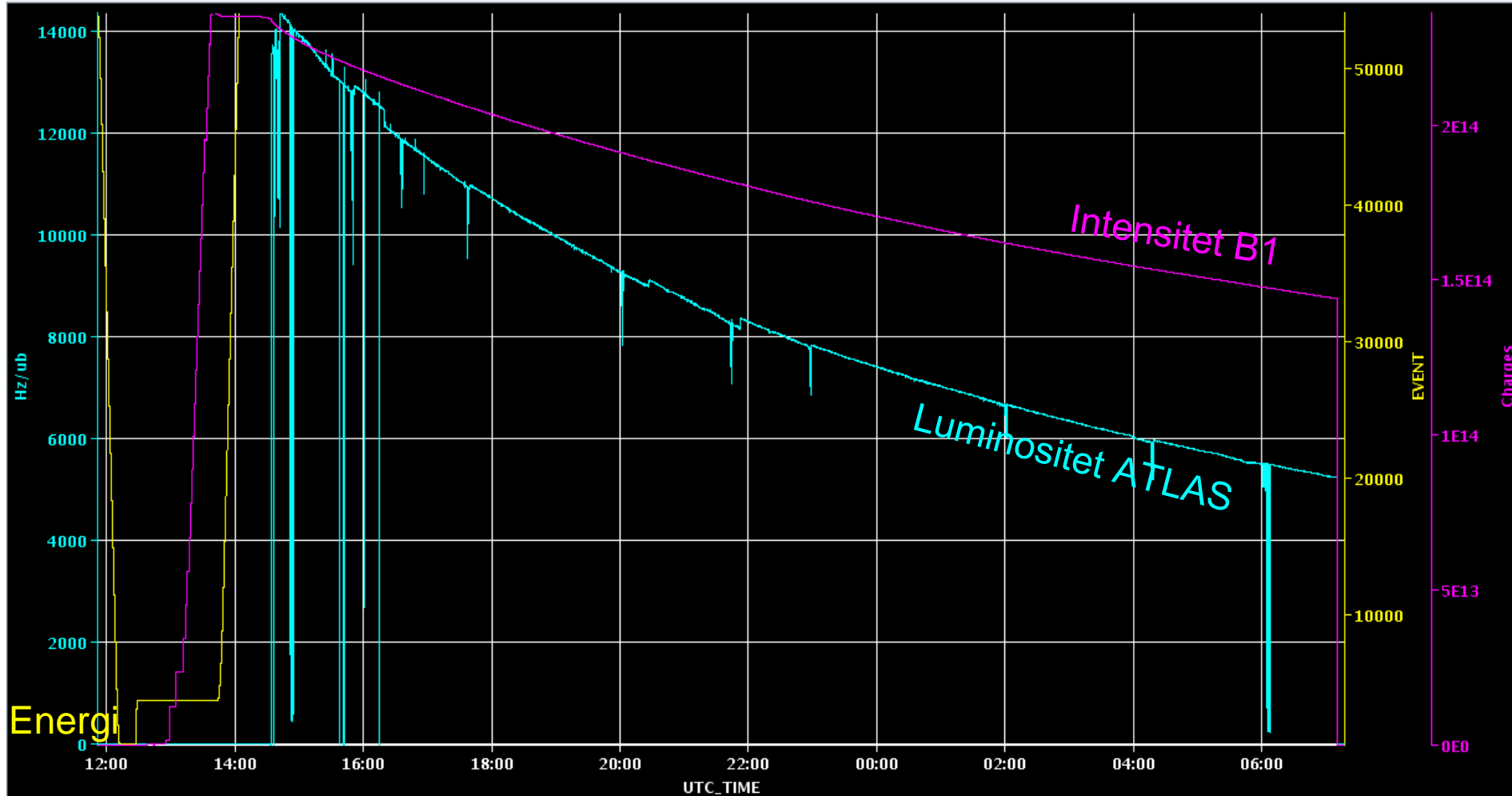




# Operation av LHC - typisk "fill"

Timeseries Chart for multiple windows

— CMS:LUMI\_TOT\_INST — HX:ENG — LHC.BCTFR.A6R4.B1:BEAM\_INTENSITY





# LHC Page 1

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

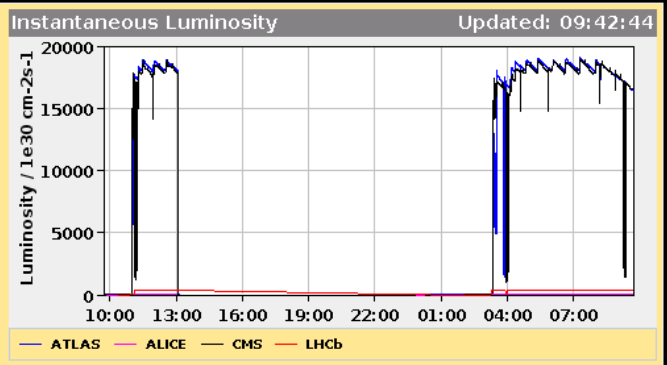
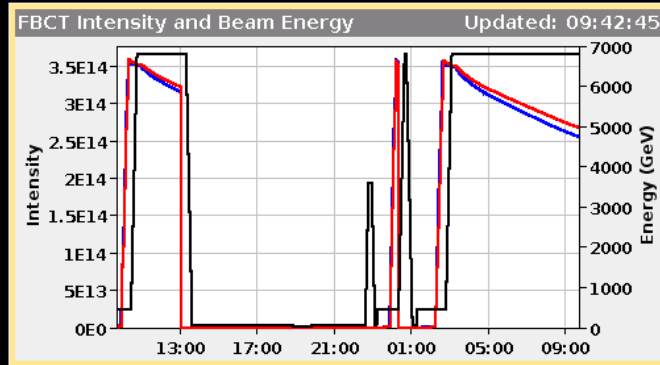
LHC Page1      Fill: 8327      E: 6800 GeV      t(SB): 06:07:53      31-10-22 09:42:47

## PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS

Energy:	6800 GeV	I B1:	2.51e+14	I B2:	2.62e+14
---------	----------	-------	----------	-------	----------

Beta* IP1:	0.30 m	Beta* IP2:	10.00 m	Beta* IP5:	0.30 m	Beta* IP8:	2.00 m
------------	--------	------------	---------	------------	--------	------------	--------

Inst. Lumi [(ub.s) <sup>-1</sup> ]	IP1: 16490.38	IP2: 9.00	IP5: 16660.32	IP8: 338.62
------------------------------------	---------------	-----------	---------------	-------------



**Comments (31-Oct-2022 09:28:23)**  
 \*\* STABLE BEAMS \*\*  
 IP2/8: levelling, XRP IN  
  
 electrical problem in point 3  
 we will dump at 10:00 to give access

BIS status and SMP flags	B1	B2
Link Status of Beam Permits	true	true
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	true	true
Stable Beams	true	true

AFS: 25ns\_2462b\_2450\_1737\_1735\_180bpi\_17inj\_2INDIV PM Status B1 **ENABLED** PM Status B2 **ENABLED**

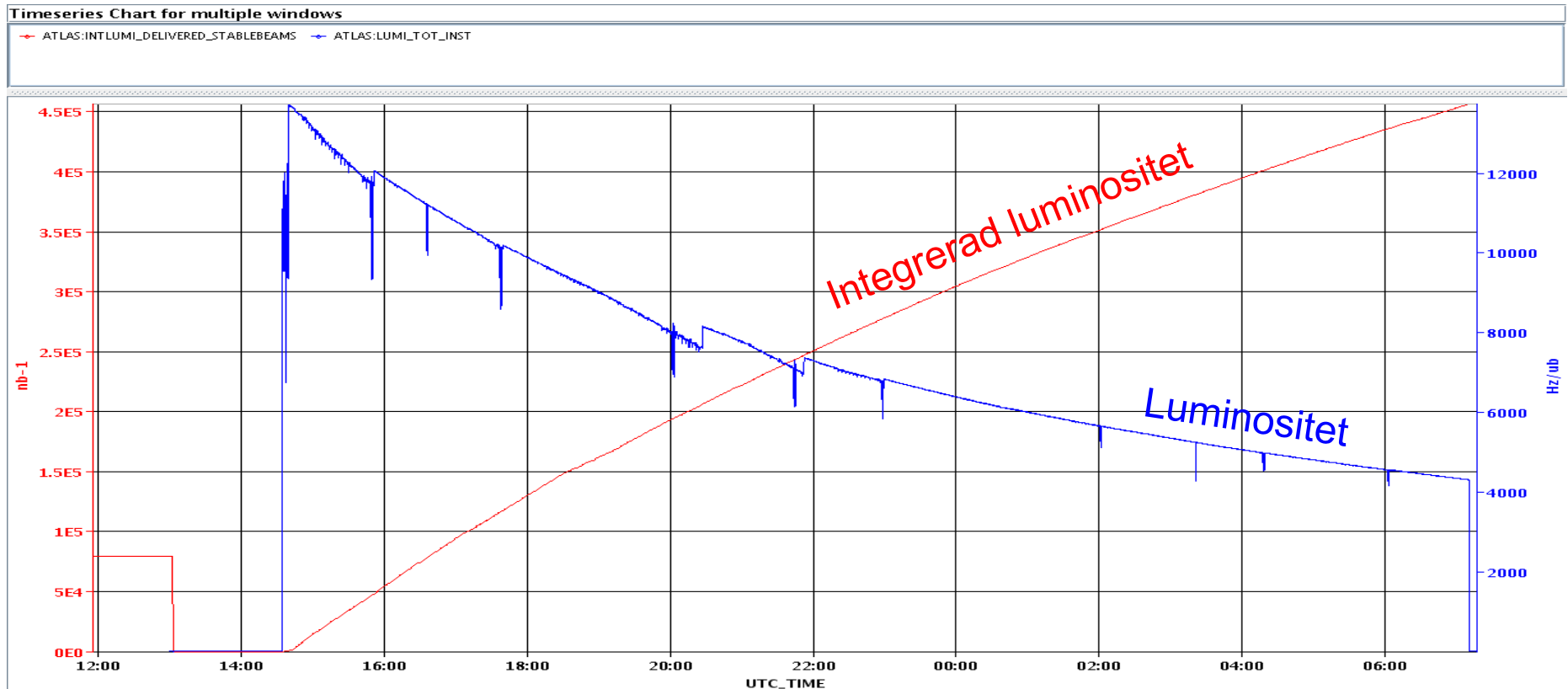
# Nominell luminositet $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ uppnådd och överträffad för första gången 2016!





# Integrerad luminositet

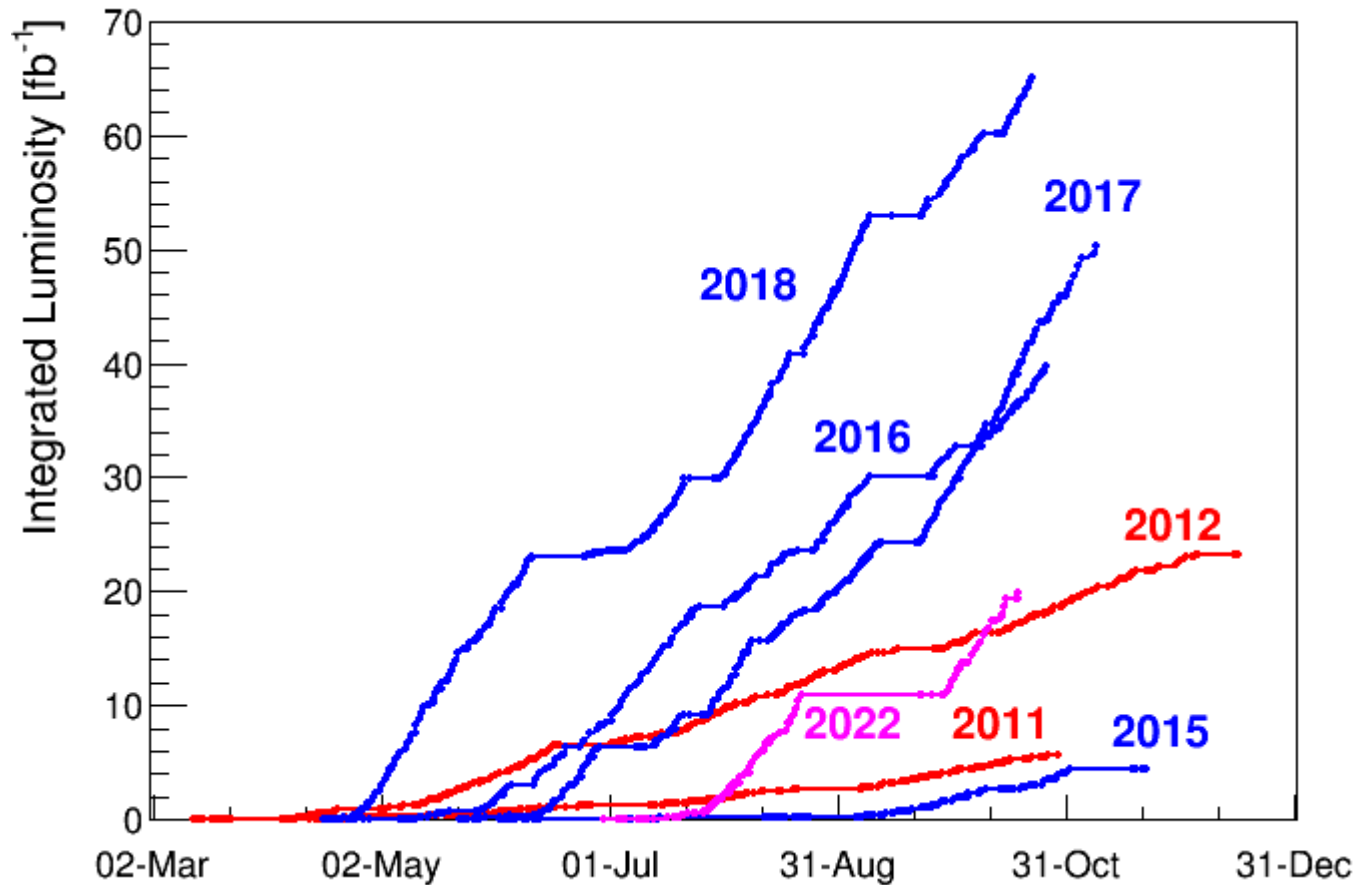
- (Antal kollisioner per sekund) = träffyta \* luminositet
- Totalt antal kollisioner = träffyta \*  $\int$  luminositet dt
- Integrerad luminositet är vad som avgör hur mycket statistik experimenten får. Helt avgörande för att göra upptäckter...







# Integrerad luminositet under åren

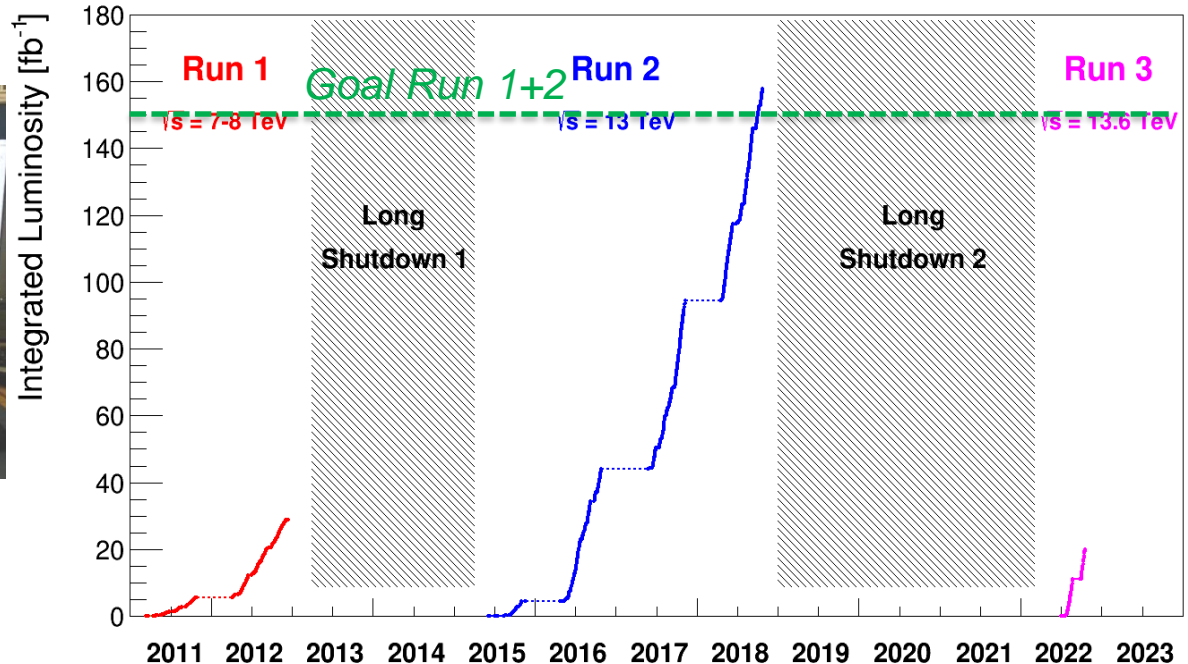
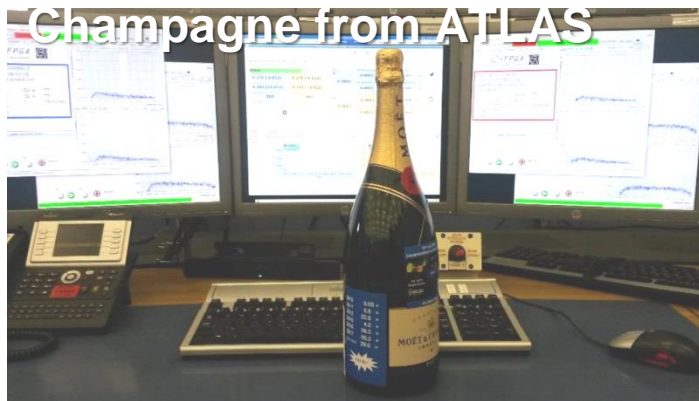


- LHC har haft haft sitt bästa år hittills 2018! Betydligt mer data samlat än under 2012 då Higgs-partikeln upptäcktes
- 2022: uppstart igen efter “long shutdown” för underhåll



# More champagne

- In 2018, reached LHC goal of  $150 \text{ fb}^{-1}$  in Run 1 and Run 2 combined
- Reached even  $150 \text{ fb}^{-1}$  in Run 2 alone!
- In Run 3: Hope to integrate almost  $300 \text{ fb}^{-1}$





# More celebrations in 2022!

July 5<sup>th</sup>, 2022  
Start of Run 3 physics !



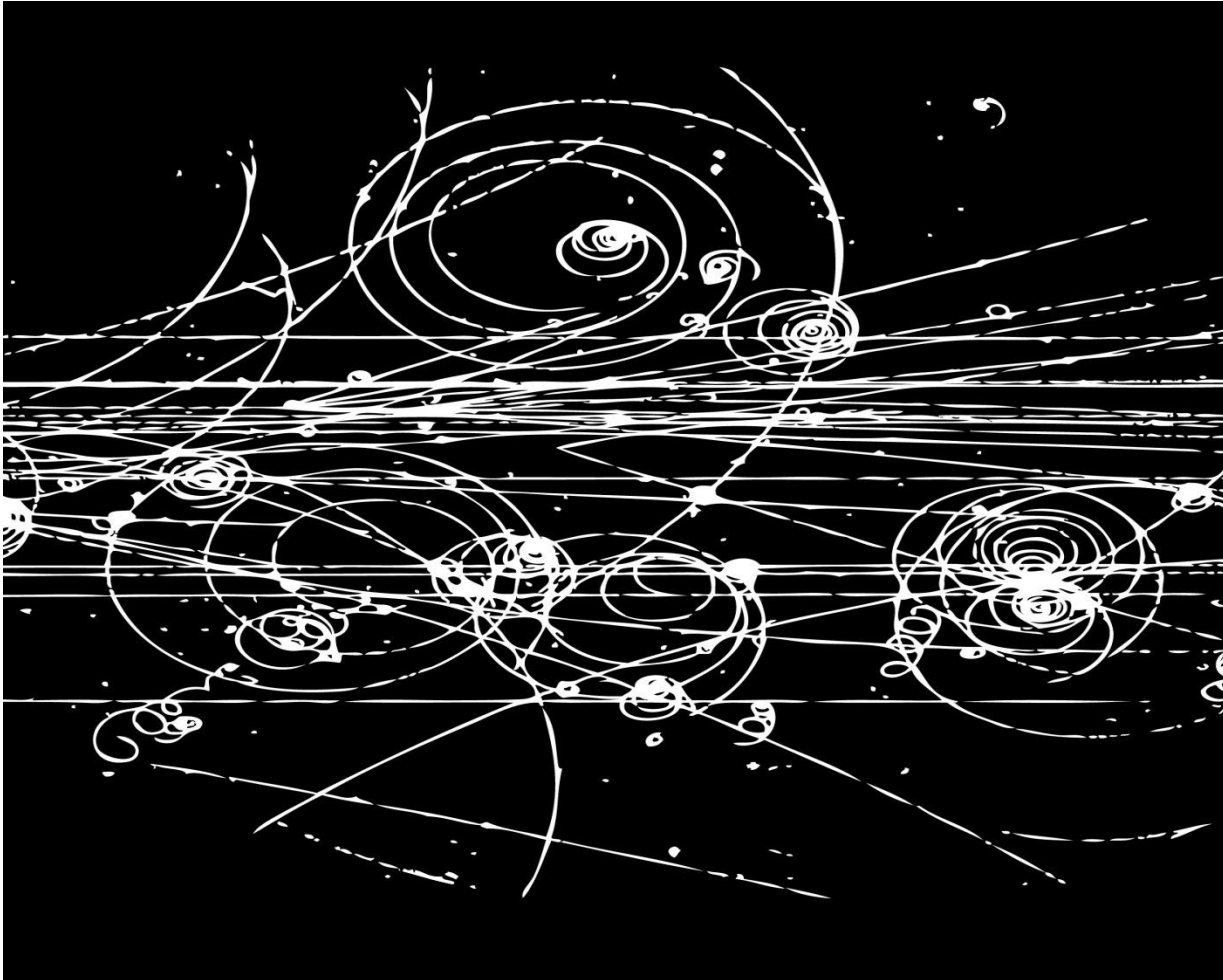
Big media event with first collisions at 6.8 TeV  
(new record-high energy for p-p collisions!)





# Kollisioner igår

Bubbelkammaren 30 cm i diameter, fylls med flytande väte

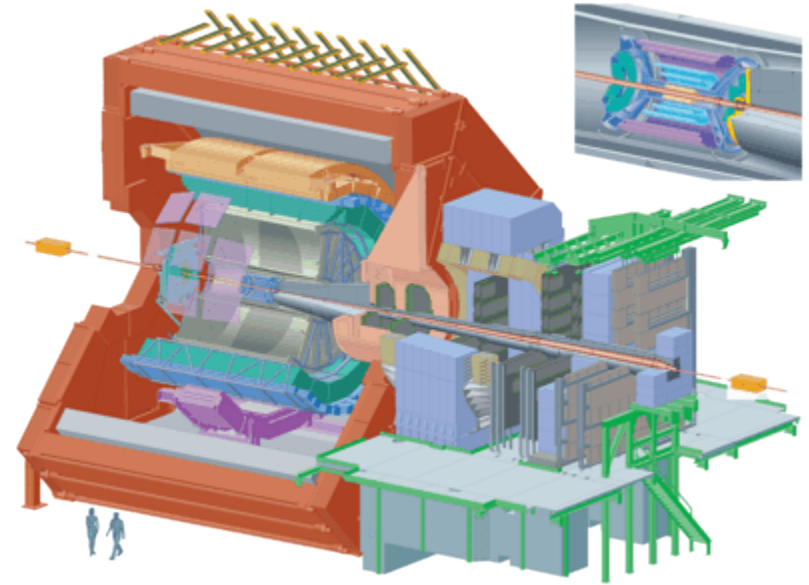
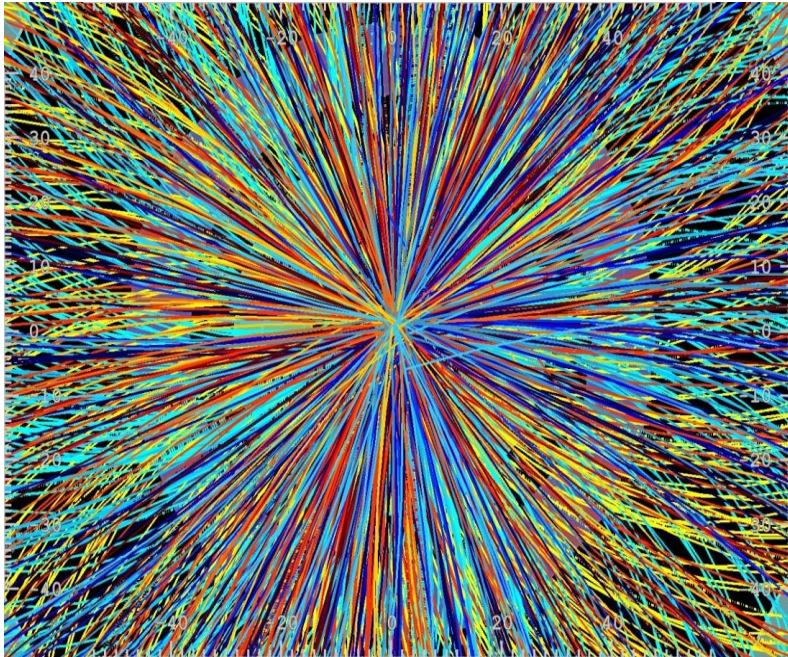






# Kollisioner idag

ALICE@LHC



Integrerad luminositet 2017 är  $45 \text{ fb}^{-1} \Rightarrow$  ca  $4.3\text{E}15$  protonkollisioner!

Det ska bli spännande att se vad som upptäcks härnäst!



for your attention!

Frågor?



# Referenser

- What do we need to understand and optimize the LHC  
O.S. Brüning, CERN, Geneva, Switzerland  
M.S. Livingston and E.M. McMillan, 'History of the Cyclotron', Physics Today, 1959
- S. Weinberg, 'The Discovery of Subatomic Particles', Scientific American Library, 1983. (ISBN 0-7167-1488-4 or 0-7167-1489-2 [pbk]) (539.12 WEI)
  - C. Pellegrini, 'The Development of Colliders', AIP Press, 1995. (ISBN 1-56396-349-3) (93:621.384 PEL)
  - P. Waloschek, 'The Infancy of Particle Accelerators', DESY 94-039, 1994.
  - R. Carrigan and W.P. Trower, 'Particles and Forces - At the Heart of the Matter', Readings from Scientific American, W.H. Freeman and Company, 1990.
  - Leon Lederman, 'The God Particle', Delta books 1994
  - Lillian Hoddeson (editor), 'The rise of the standard model: particle physics in the 1960s and 1970s', Cambridge University Press, 1997
  - S. Weinberg, 'Reflections on Big Science', MIT Press, 1967 (5(04) WEI)
- Introduction to Particle Accelerator Physics:
- J.J. Livingood, 'Principles of Cyclic Particle Accelerators', D. Van Nostrand Company, 1961
  - M.S. Livingston and J.P. Blewett, 'Particle Accelerators', McGraw-Hill, 1962
  - Mario Conte and William McKay, 'An Introduction to the Physics of Particle Accelerators', World Scientific, 1991
  - H. Wiedemann, 'Particle Accelerator Physics', Springer Verlag, 1993.
  - CERN Accelerator School, General Accelerator Physics Course, CERN Report 85-19, 1985.
  - CERN Accelerator School, Second General Accelerator Physics Course, CERN Report 87-10, 1987.
  - CERN Accelerator School, Fourth General Accelerator Physics Course, CERN Report 91-04, 1991.