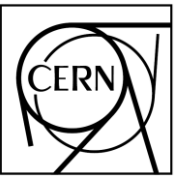


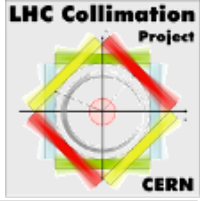
# **Projects performed by a Swedish student/fellow/staff**

**Roderik Bruce**

**CERN - BE/ABP, Geneva, Switzerland**



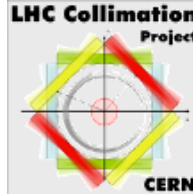
# Outline



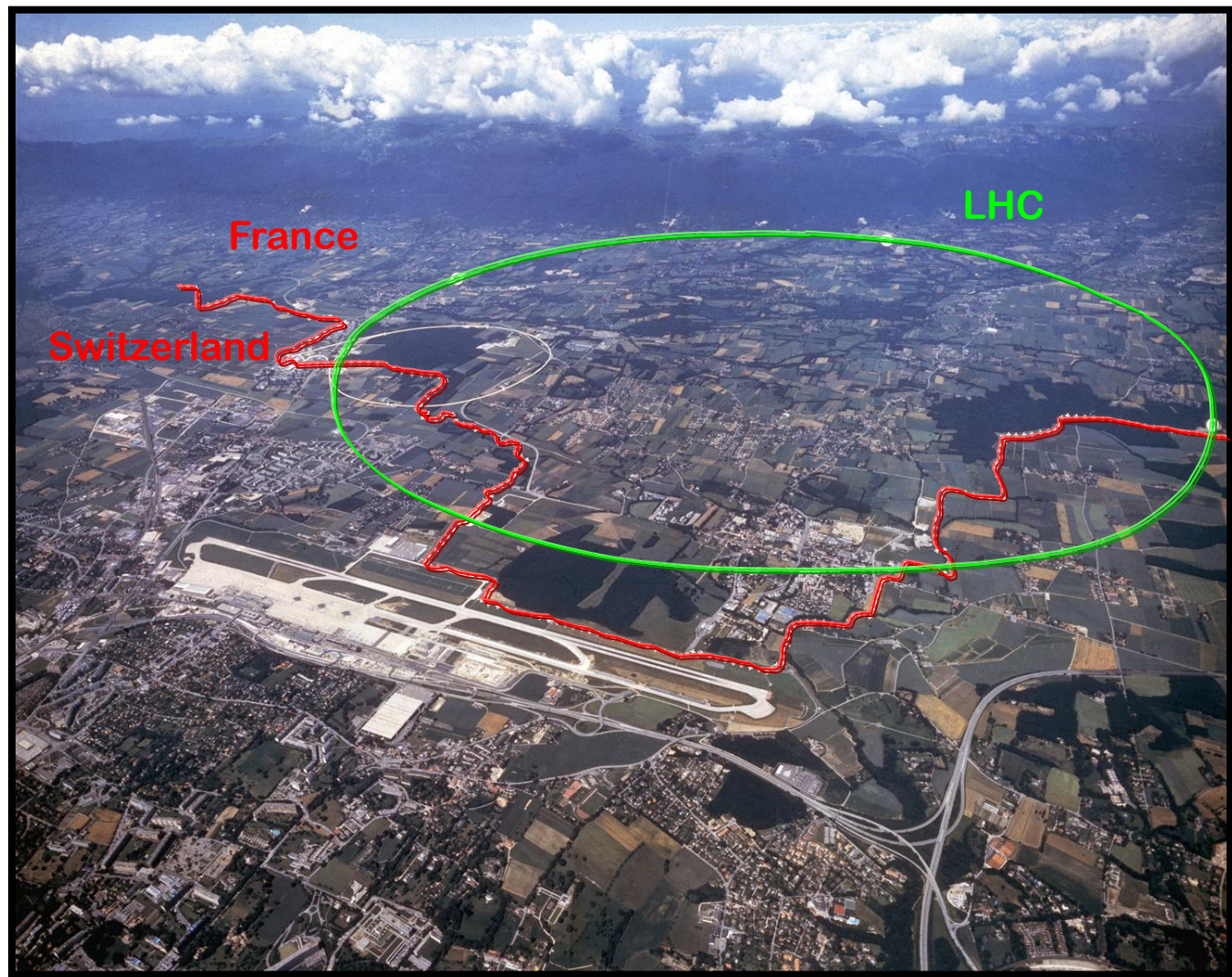
- **Introduktion: LHC**
- **Simuleringar av kollimeringsystemet i LHC**
- **Simuleringar av bakgrund i ATLAS och CMS från kollimering**
- **Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna för att maximera luminositeten**
- **Strålförluster orsakade av elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande  $\text{Pb}^{82+}$  joner**



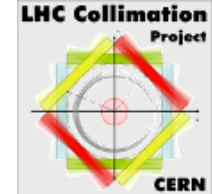
# LHC (Large Hadron Collider)



- Största acceleratorn någonsin tillsammans med LEP
- 27 km omkrets, 100 m under jord
- Går genom både Schweiz och Frankrike
- Design påbörjades på 80-talet, godkänd 1995





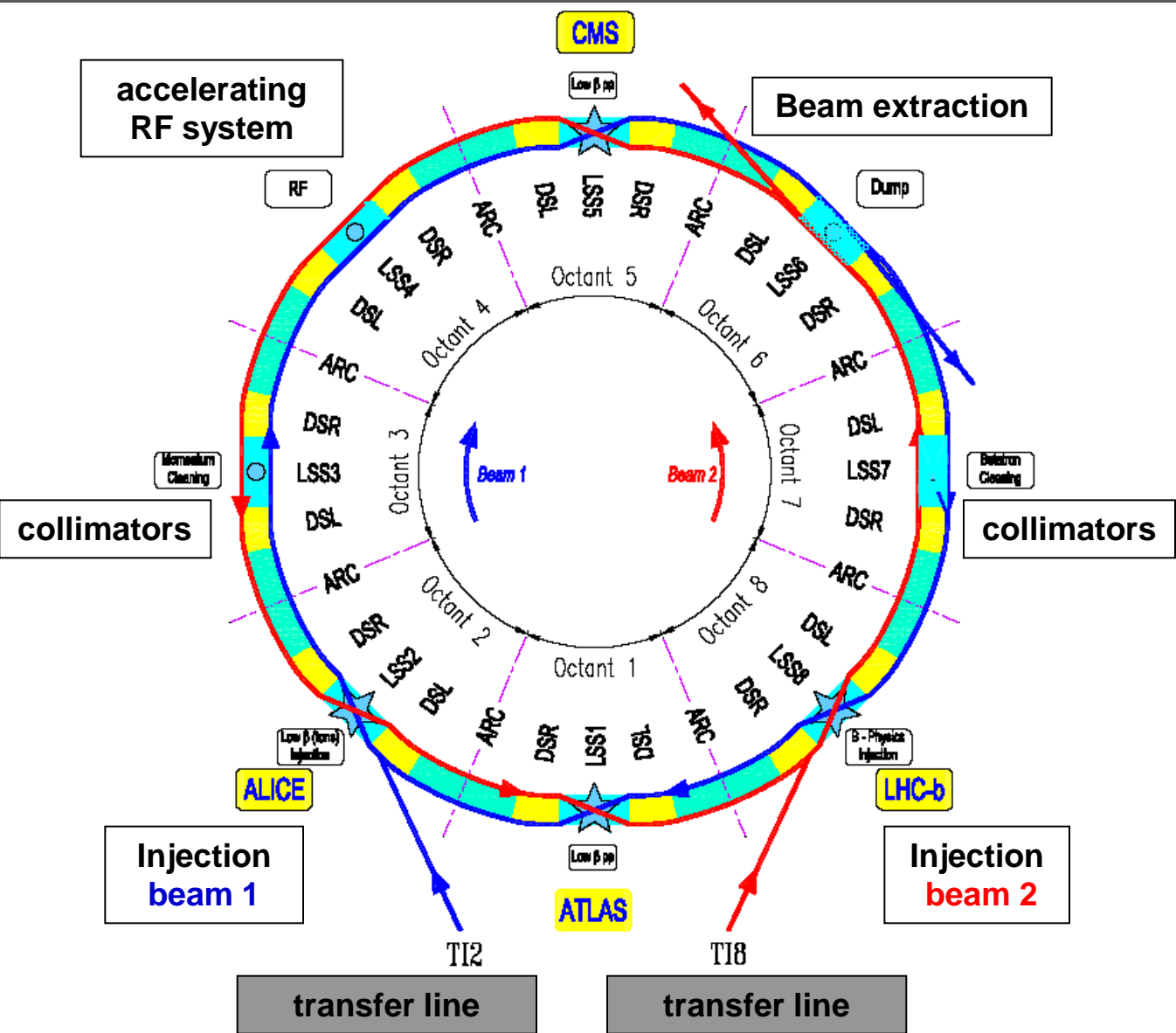


# Large Hadron Collider

- Högsta energin någonsin. Hittills: 3.5-4 TeV, design: 7 TeV
- Operation med både protoner och  $Pb^{82+}$ -joner



# Large Hadron Collider



- 8 raka sektioner, 8 bågar
- Buncher med partiklar cirkulerar med motsatt omloppsriktning
- Kollisioner vid 4 experiment: ATLAS, CMS, LHCb, ALICE
- Operationscykel:
  - Injektion (450 GeV)
  - Acceleration till 3.5-4 TeV
  - Kollisioner (timmar)
  - Dump av återstående stråle



# Partikelstrålar i LHC



- LHC körs nu med halva energin
- LHC körs ~1 månad/år med joner.

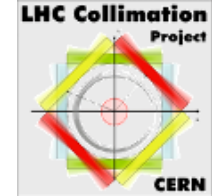
Partikel	Protoner 2011	Protoner design	Pb <sup>82+</sup> design
Energi	3.5 TeV	7 TeV	2.76 TeV/nukleon
Antal buncher	1380	2808	592
Partiklar/bunch	~1.4e11	1.15e11	7e7
Luminositet	3.5e33 cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	1e34 cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	1e27 cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Total energi i strålen	23 MJ	362 MJ	3.81 MJ

- LHC måste skyddas effektivt! Även en liten del av strålen kan orsaka skador.





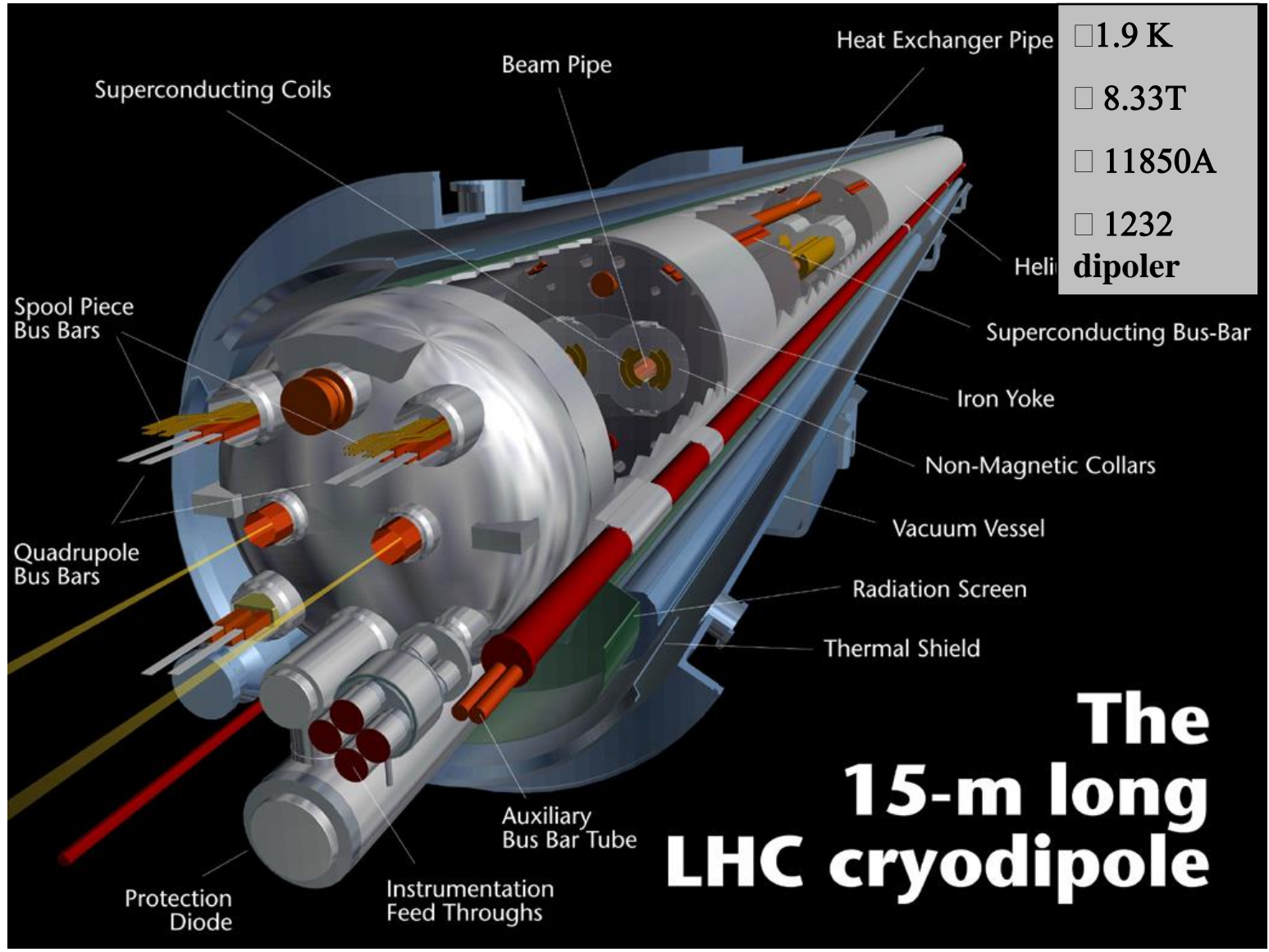
# Partikelstrålar i LHC



**362 MJ = kinetic energy of X2000 train cruising at 168 km/h**



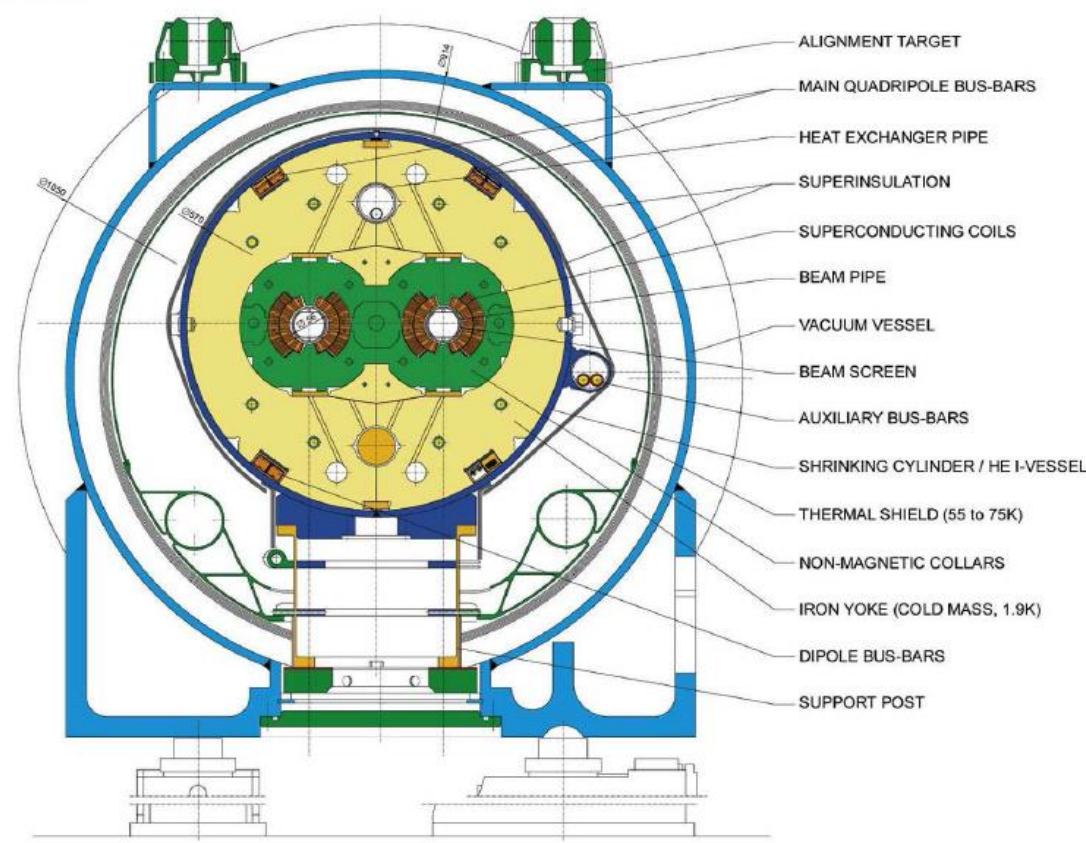
# Supraleedande magneter





# Quenchning av magneter

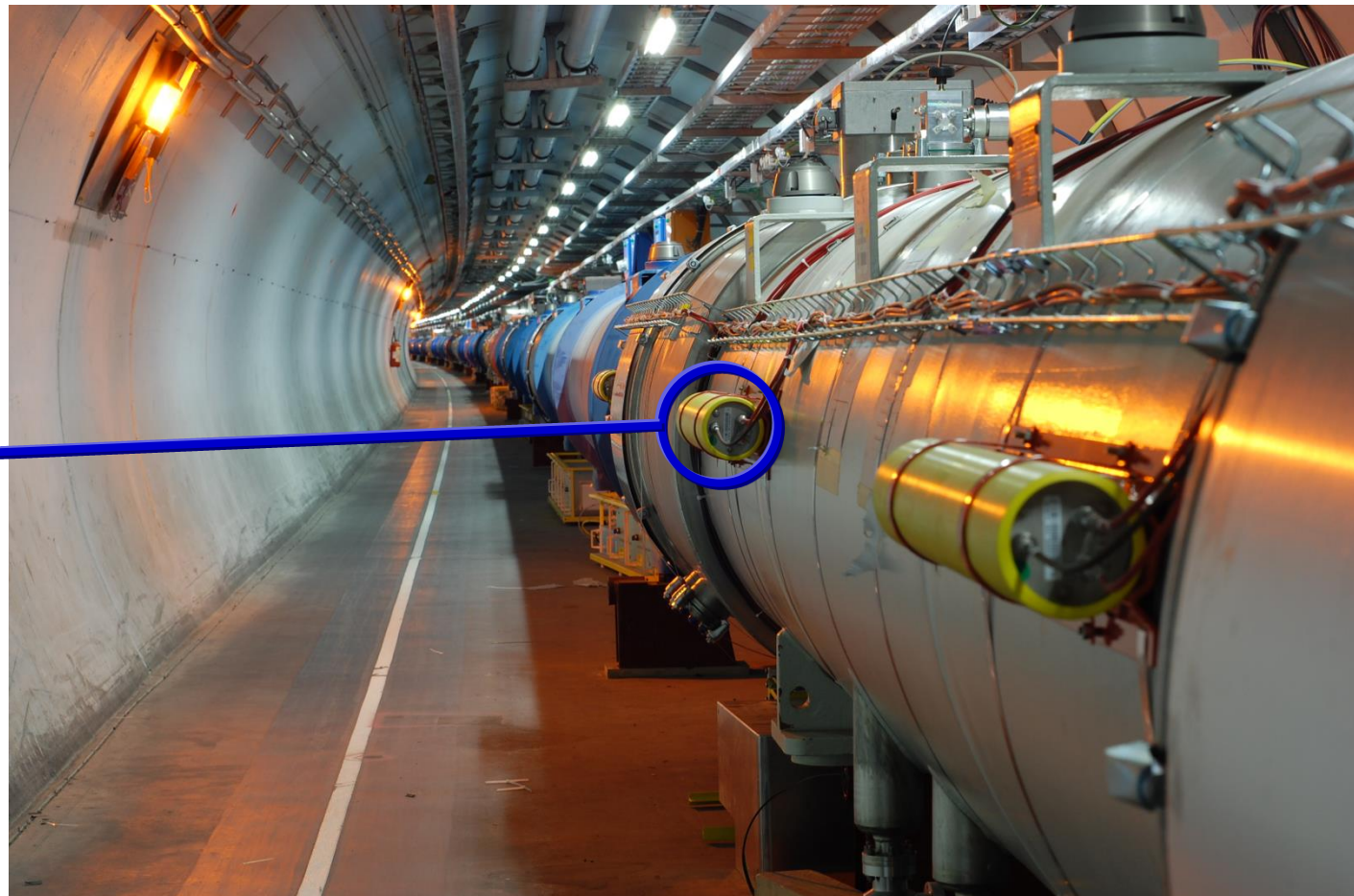
- 9300 magneter i LHC, många supraledande vid  $T=1.9\text{ K}$
- Magneterna lämnar supraledande tillstånd (**quench**) om de värms upp
- Quenchar måste undvikas!
- Förluster av partiklar från strålen kan orsaka uppvärmning. Övervakas med strålförlustmonitorer (BLMs)

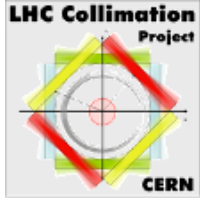
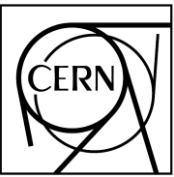


Transverse cross section of a 14.6 m LHC cryo dipole

# Strålförlustmonitorer

- BLMs (beam loss monitors) detekterar sekundära partiklar skapade när en proton träffar insidan av strålpipen
- Om höga förluster mäts upp dumpas strålen





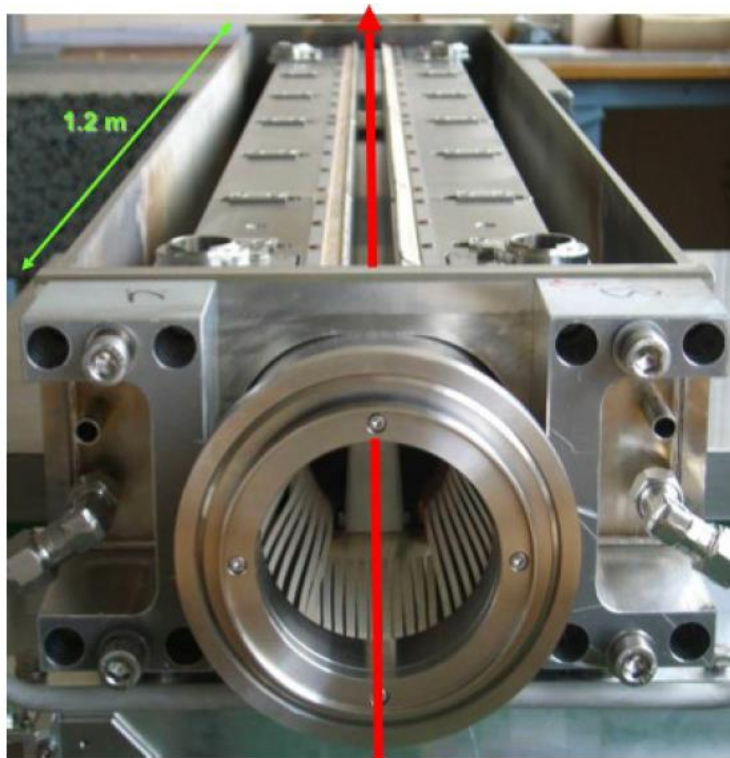
# Outline

- **Introduktion: LHC**
- **Simuleringar av kollimeringsystemet i LHC**
- **Simuleringar av bakgrund i ATLAS och CMS från kollimering**
- **Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna för att maximera luminositeten**
- **Strålförluster orsakade av elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande  $\text{Pb}^{82+}$  joner**

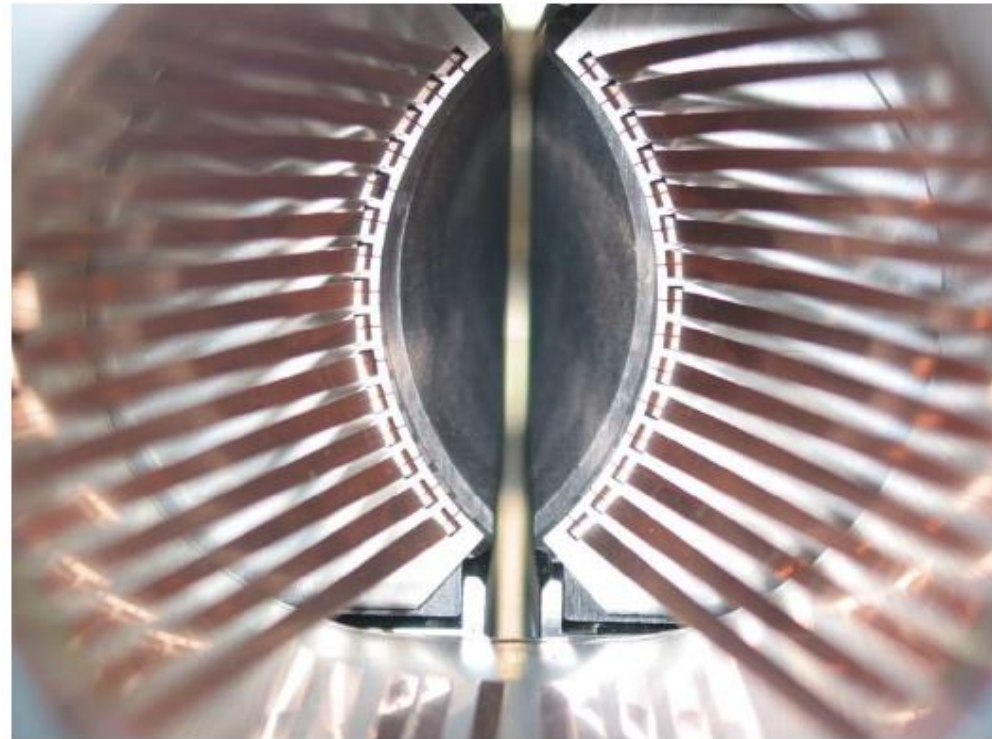


# Kollimering i LHC

- Även mycket små strålförluster ( $7.8e6$  p/m/s) kan orsaka en quench
- Kollimatorer (flyttbara block av kol eller wolfram) används för att skydda magneterna
- Idé: en partikel som börjar få en omlopps bana nära aperturen träffar en kollimator före magneterna

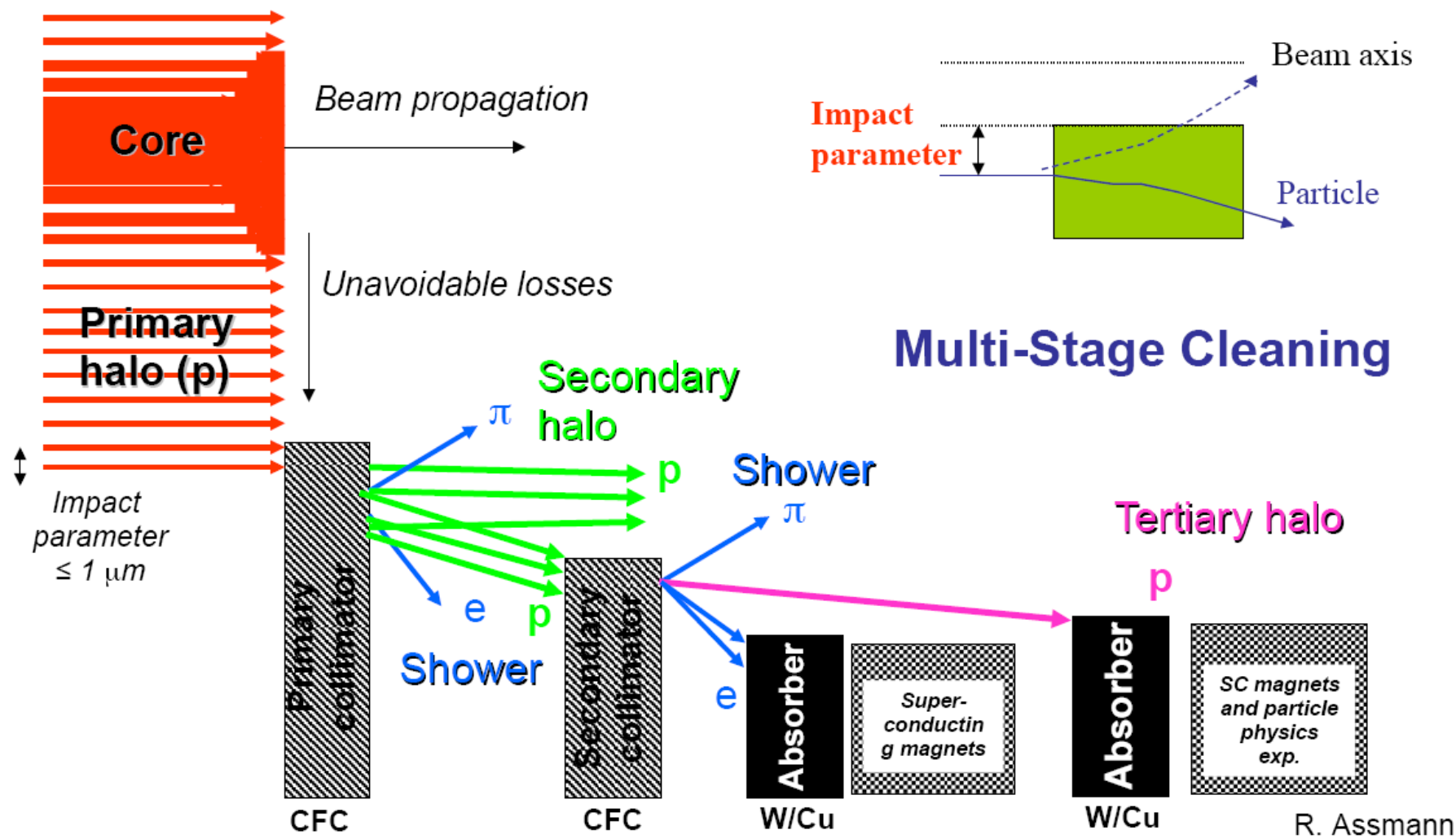


360 MJ proton beam



R. Bruce

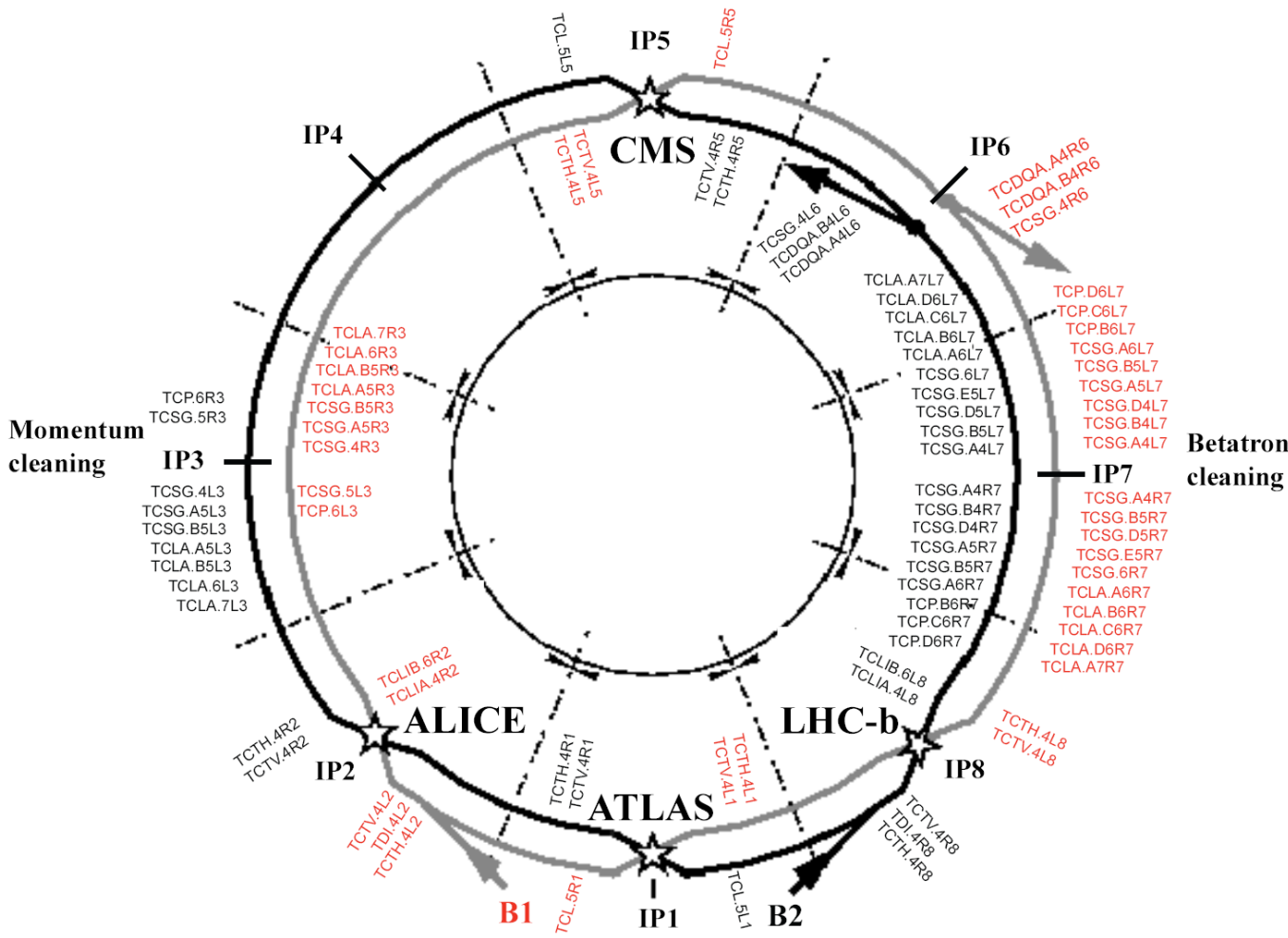
# Layout för kollimeringsystemet





# Simuleringar av kollimering

- **SixTrack:** datorprogram som varv efter varv följer banan av enskilda partiklar genom en accelerator givet ett lattice (layout av magneterna)
- Interaktion mellan protoner atomerna i kollimatorer simulerade med Monte-Carlo-rutin
- Output: distribution av strålförluster runt hela ringen

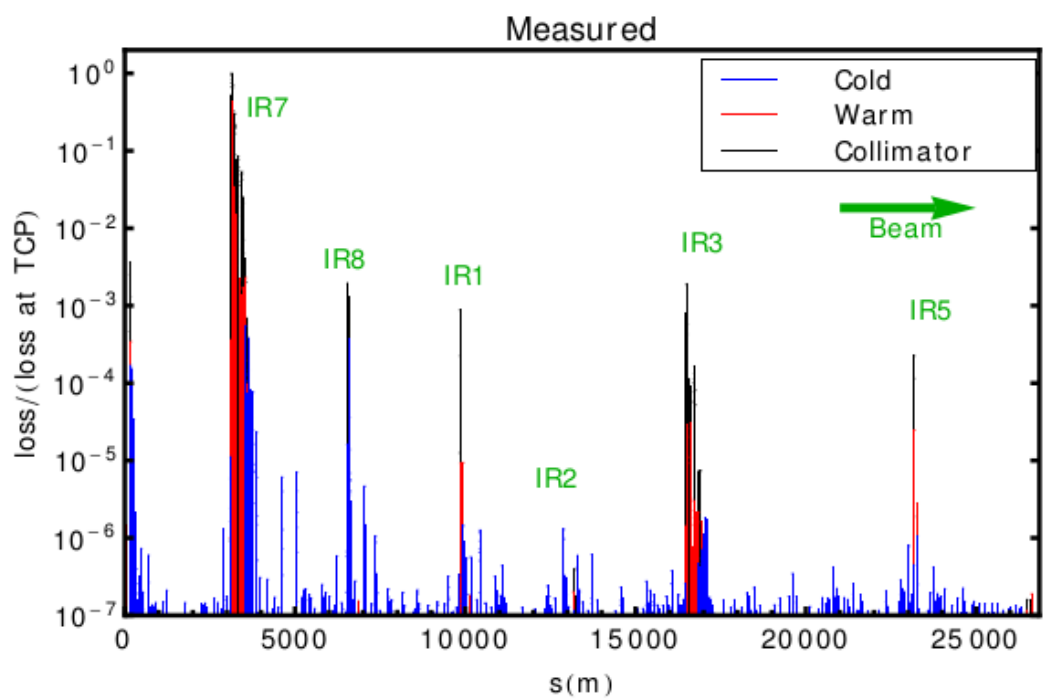
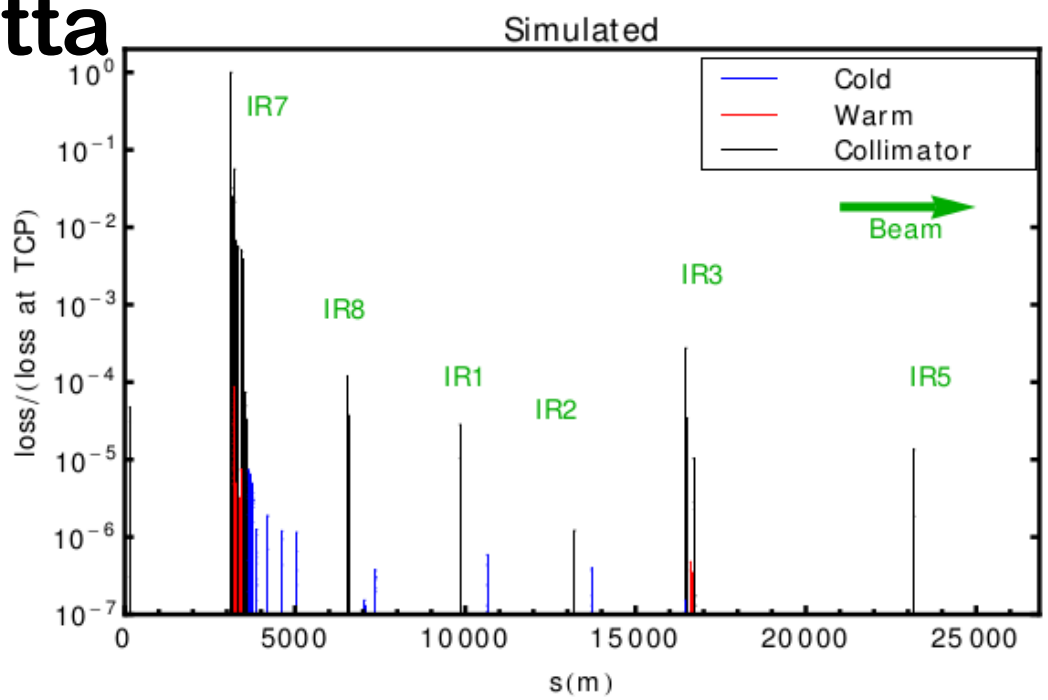






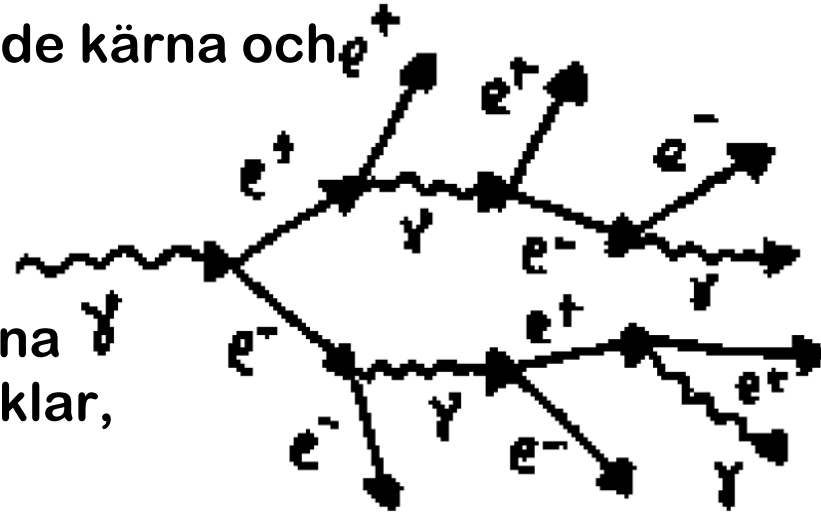
# Simulerade/mätta strålförluster

- Kvalitativt mycket god överensstämmelse mellan mätningar och simuleringar
- Kvantitativt:
  - Små okända fel i maskinen (upplinjerung av magneter och kollimatorer, fel i magnetfält etc) påverkar resultatet
  - BLM-signalen beror inte bara på antalet protoner som träffar strålpipen, men också på avstånd och material däremellan. Ett andra steg med simulering av sekundära partiklar behövs!



# Shower-simulering

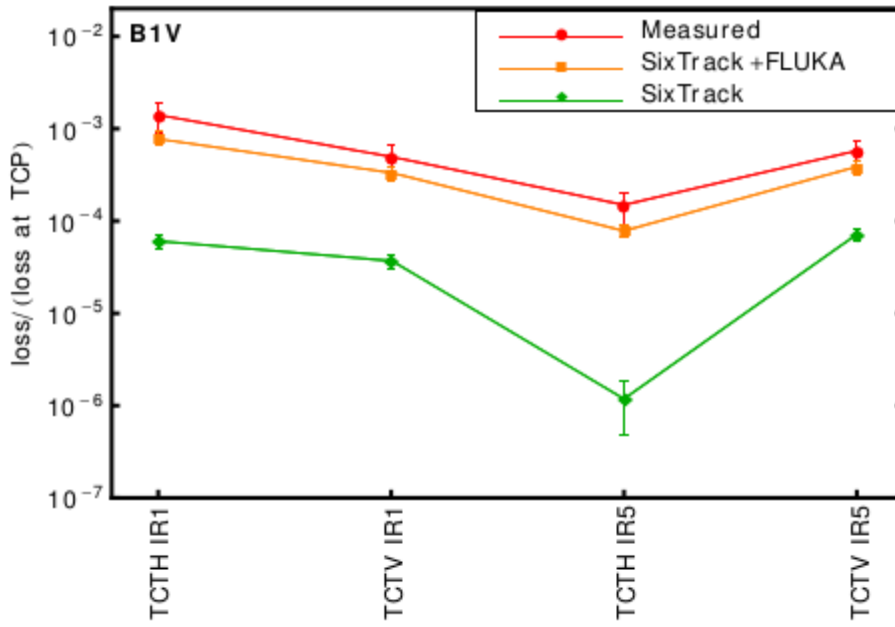
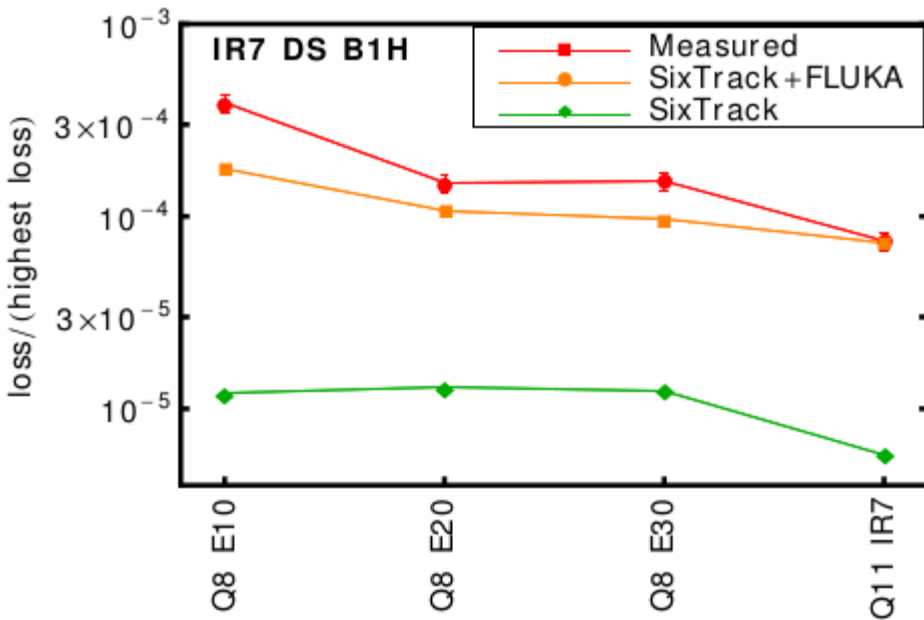
- När en hög-energetisk partikel träffar material interagerar den med atomerna, både kärna och elektroner
  - Tappar energi, ändrar riktning
  - Skapar nya partiklar
  - Kedjereaktion: de nya partiklarna skapar i sin tur ytterligare partiklar, “shower”
- “Shower” orsakad av strålförlusterna simulerad med programmet FLUKA (F. Cerutti, E. Skordis)
- En liten andel av partiklarna från showern kommer till en BLM och orsakar en signal



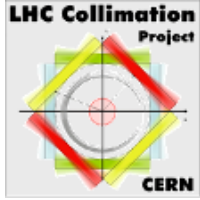
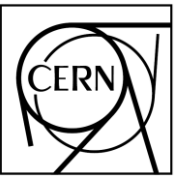


# Simulerade/mätta strålförluster


- Shower vid vissa utvalda BLMs simulerade i ett andra steg med FLUKA (F. Cerutti, E. Skordis).
- När imperfektioner och shower tas med i beräkningen, blir överensstämmelsen mycket bättre!
- Studien bekräftar att SixTrack+FLUKA tillsammans ger mycket realistiska resultat
- Simuleringarna används nu som ett hjälpmedel i att designa framtida uppgraderingar av LHC





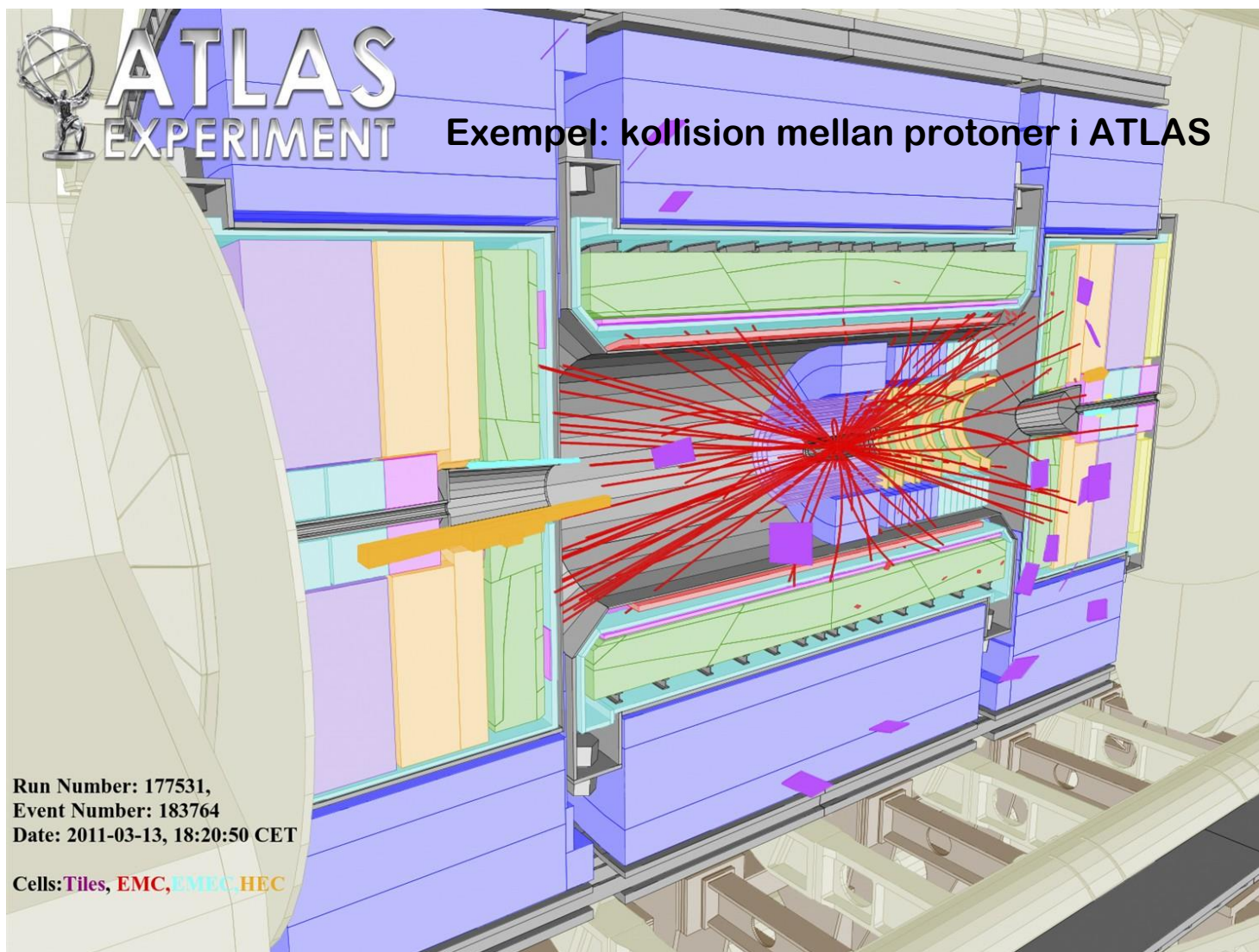


# Outline

- **Introduktion: LHC**
- **Simuleringar av kollimeringsystemet i LHC**
-  • **Simuleringar av bakgrund i ATLAS och CMS från kollimering**
- **Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna för att maximera luminositeten**
- **Strålförluster orsakade av elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande  $\text{Pb}^{82+}$  joner**

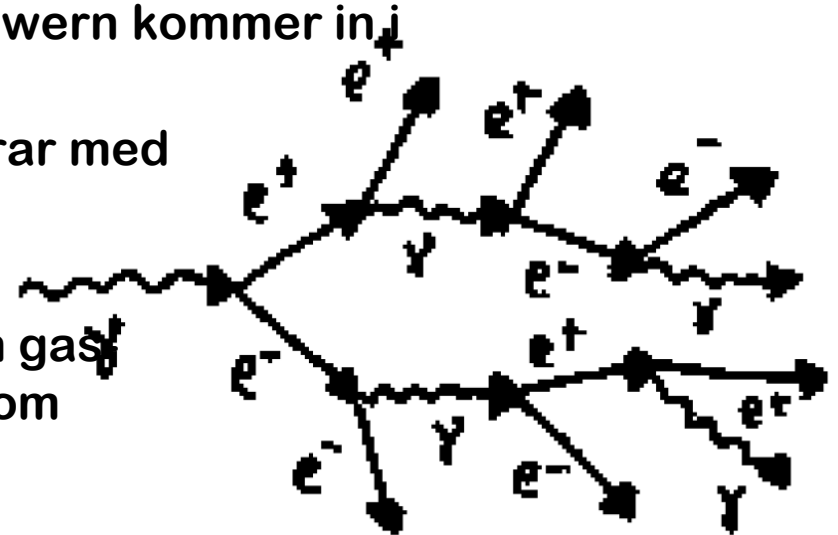
# Bakgrund i detektorerna

- Varje spår är en partikel
- Partiklar kan komma in utifrån och skapa oönskad signal (bakgrund)
- Liknande processer inträffar då en proton träffar atomerna i ett material
- Shower från strålförluster nära detektorn kan orsaka bakgrund

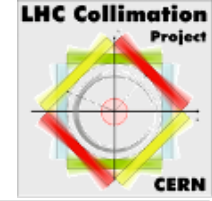


# Bakgrund från kollimering och gas

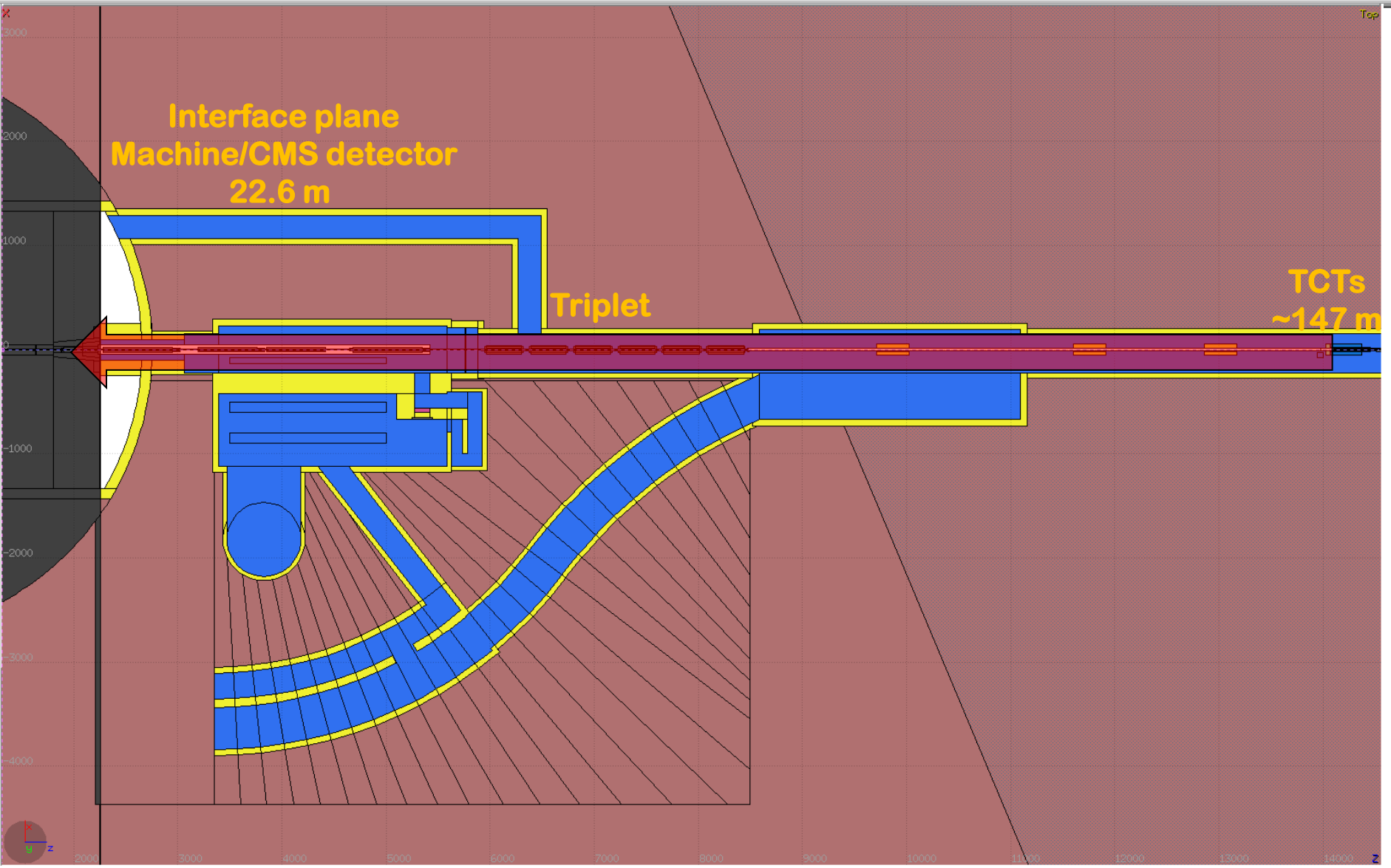
- Tertiära kolimatorer (TCTs) installerade runt experimenten i LHC
  - Skydda viktiga maskinkomponenter mot förluster
  - Minska bakgrund
- Dock: läckage av partiklar ut ur TCT
- Shower ut från tertiära kollimatorer simulerade med programmet FLUKA
- En liten andel av partiklarna från showern kommer in i experimenten och skapar bakgrund
- På samma sätt: protonerna interagerar med gasmolekyler som finns i strålpipnan
  - Vakuumet är inte perfekt!
- Vi interaktionerna mellan strålen och gasmolekyler bildas också en shower, som skapar bakgrund







# Simuleringar av bakgrund



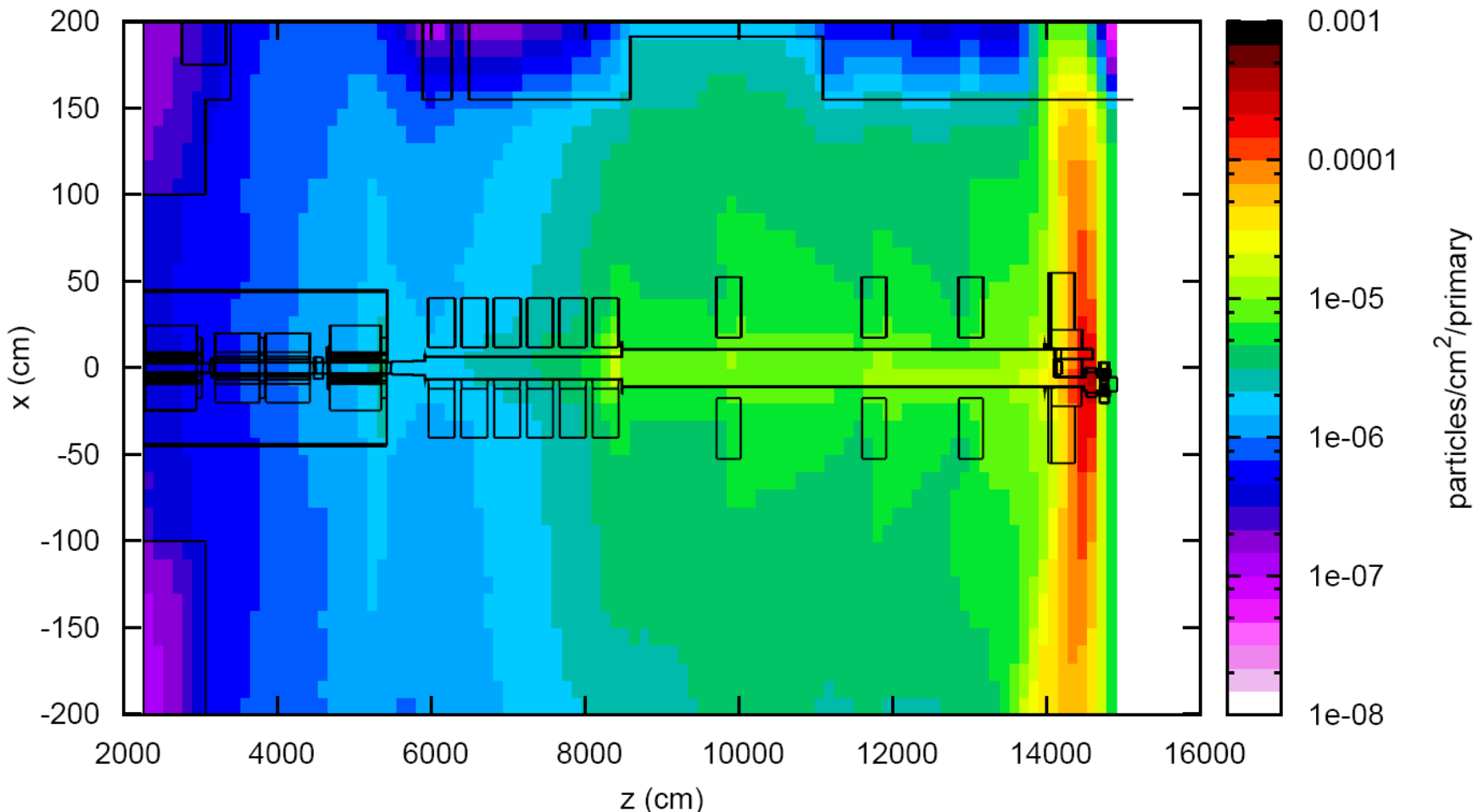


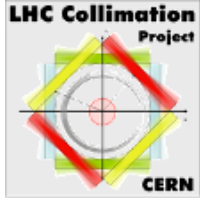
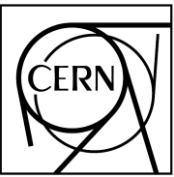
# Resultat av FLUKA-simulering




- Exempel på resultat: flöde av myoner från TCTs till detektorn
- Vektorer med koordinater och rörelsemängd för partiklar på gränsen till detektorn används av experimenten för att simulera bakgrund

Muon fluence XYZ



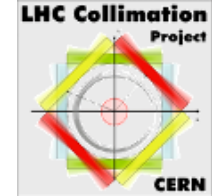


# Outline

- **Introduktion: LHC**
- **Simuleringar av kollimeringsystemet i LHC**
- **Simuleringar av bakgrund i ATLAS och CMS från kollimering**
-  • **Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna för att maximera luminositeten**
- **Strålförluster orsakade av elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande  $\text{Pb}^{82+}$  joner**



# Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna



- Experimenten vill ha så hög luminositet som möjligt (se föregående föredrag):

$$L = f_{rev} \frac{N_B n_1 n_2}{4\pi \sqrt{\epsilon_x \beta_x^* \epsilon_y \beta_y^*}} F$$

Antalet Bunchar i Strålen →  $N_B$   
 Revolution Frekvensen →  $f_{rev}$   
 Antalet Partiklar per Bunch i Stråle 1 →  $n_1$   
 Faktor för vinkeln mellan strålarna vid kollision →  $F$   
 Emittansen →  $\epsilon_x$   
 Amplitud Funktionen,  $\beta_x$ , vid Kollisions Punkten →  $\beta_x^*$   
 Emittansen →  $\epsilon_y$   
 Amplitud Funktionen,  $\beta_y$ , vid Kollisions Punkten →  $\beta_y^*$

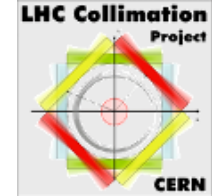
Storlek på strålen i kollisionspunkten

- Ju mindre strålstorlek, desto högre är partikeltätheten och sannolikheten för kollisioner när två buncher går genom varandra
- Ökad luminositet uppnås genom fler buncher, fler partiklar per bunch och mindre strålstorlek i kollisionspunkten.

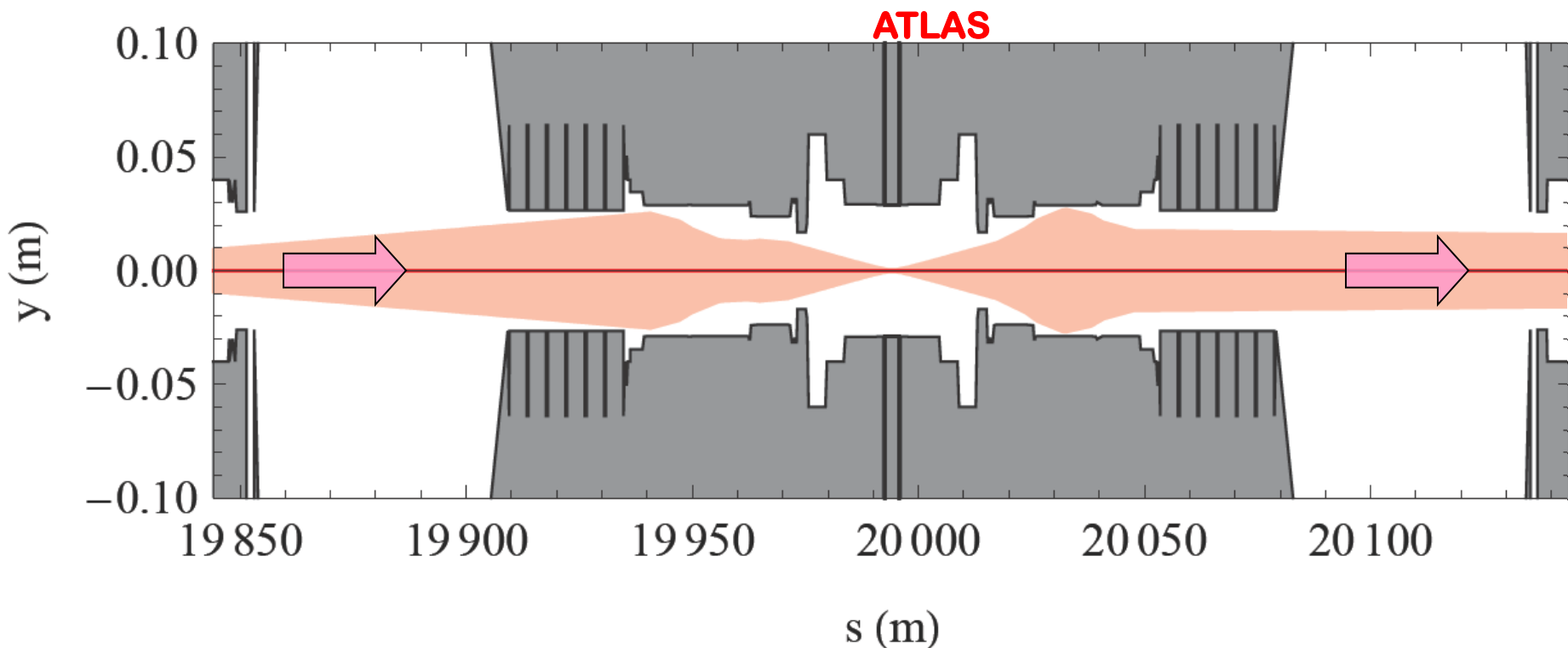




# Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna

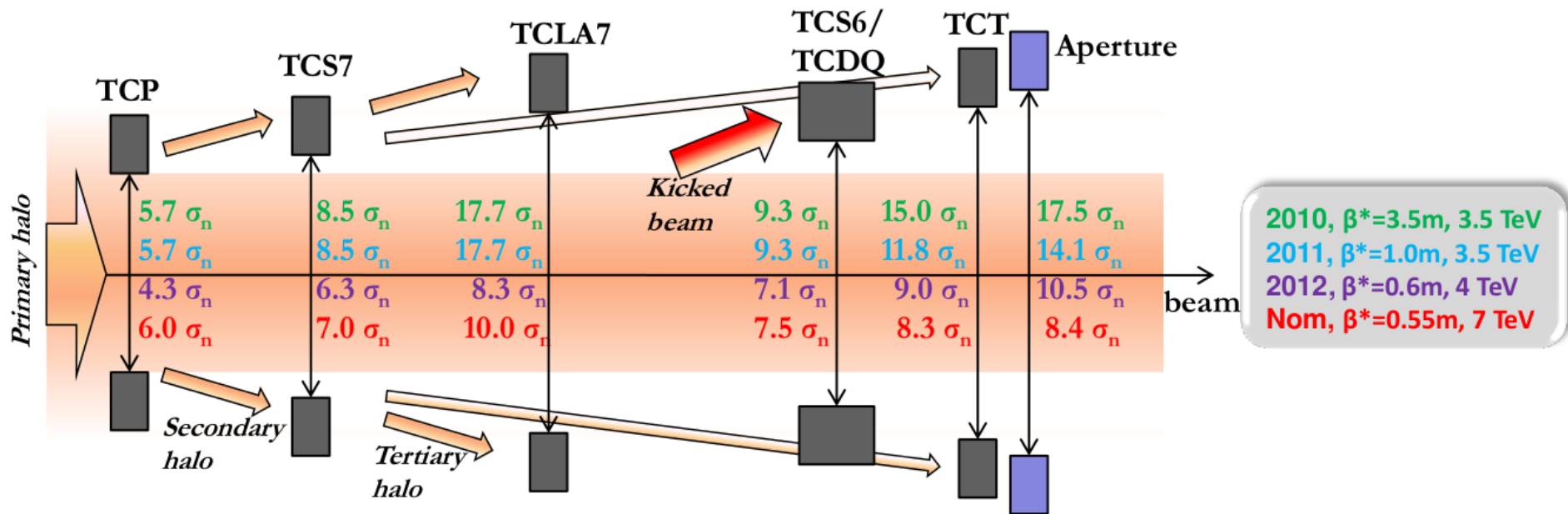
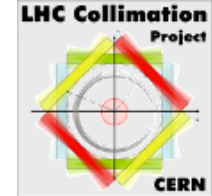


- Strålen fokuseras i kollisionspunkten av quadrupolmagneter
- Nominell strålstorlek i kollisionspunkten:  $16\mu\text{m}$ . Nu: ungefär  $22\mu\text{m}$
- När strålen fokuseras i kollisionspunkten blir den större i triplet-magneterna
- Om strålen blir för stor där, kan oönskade strålförluster och quenchar inträffa. Mål: så liten stråle som möjligt utan att kompromissa med säkerhet





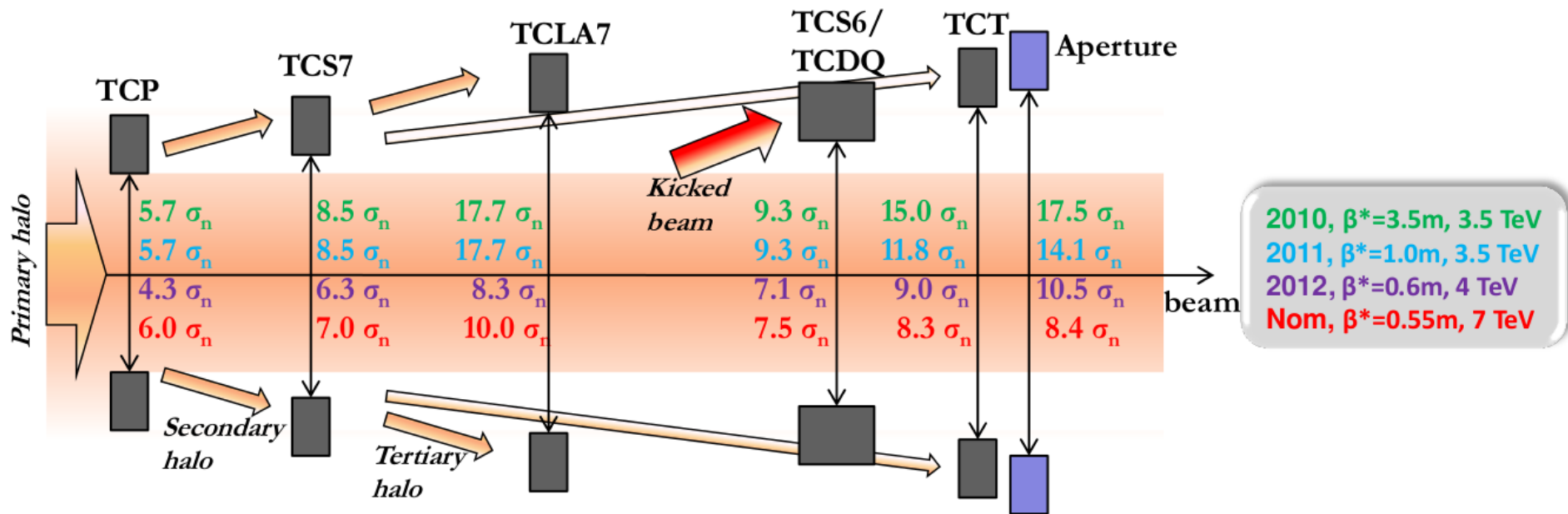
# Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna



- För att kollimeringsystemet ska fungera korrekt får aldrig en sekundär kollimator vara närmare strålen än en primär osv – **hierarki av kollimatorer**
- Strålens bana och storlek kan ändras pga av små fel i maskinen, t.ex. ej exakt position för magneter, ej idealt magnetfält etc.
- Dessa ändringar kan göra att en sekundär kollimator kommer närmare strålen än en primär



# Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna



2010,  $\beta^*=3.5m$ , 3.5 TeV  
 2011,  $\beta^*=1.0m$ , 3.5 TeV  
 2012,  $\beta^*=0.6m$ , 4 TeV  
 Nom,  $\beta^*=0.55m$ , 7 TeV

- **Marginaler nödvändiga mellan kollimatorer** för att inte hierarkin ska påverkas av felen
- 2010: väldigt väl tilltagna marginaler
- 2011 (R. Bruce, R. Assmann et al.): kvantitativ modell för att räkna ut nödvändiga marginaler baserat på data från tidigare körning av LHC
- 2012 (R. Bruce, R. Assmann et al.): förbättrad modell samt nya precisa mätningar av apertur i tripletmagneterna



# Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna



- Pga mindre marginaler tillåts nu en större stråle i tripletmagneterna, och därför en mindre stråle i kollisionerna

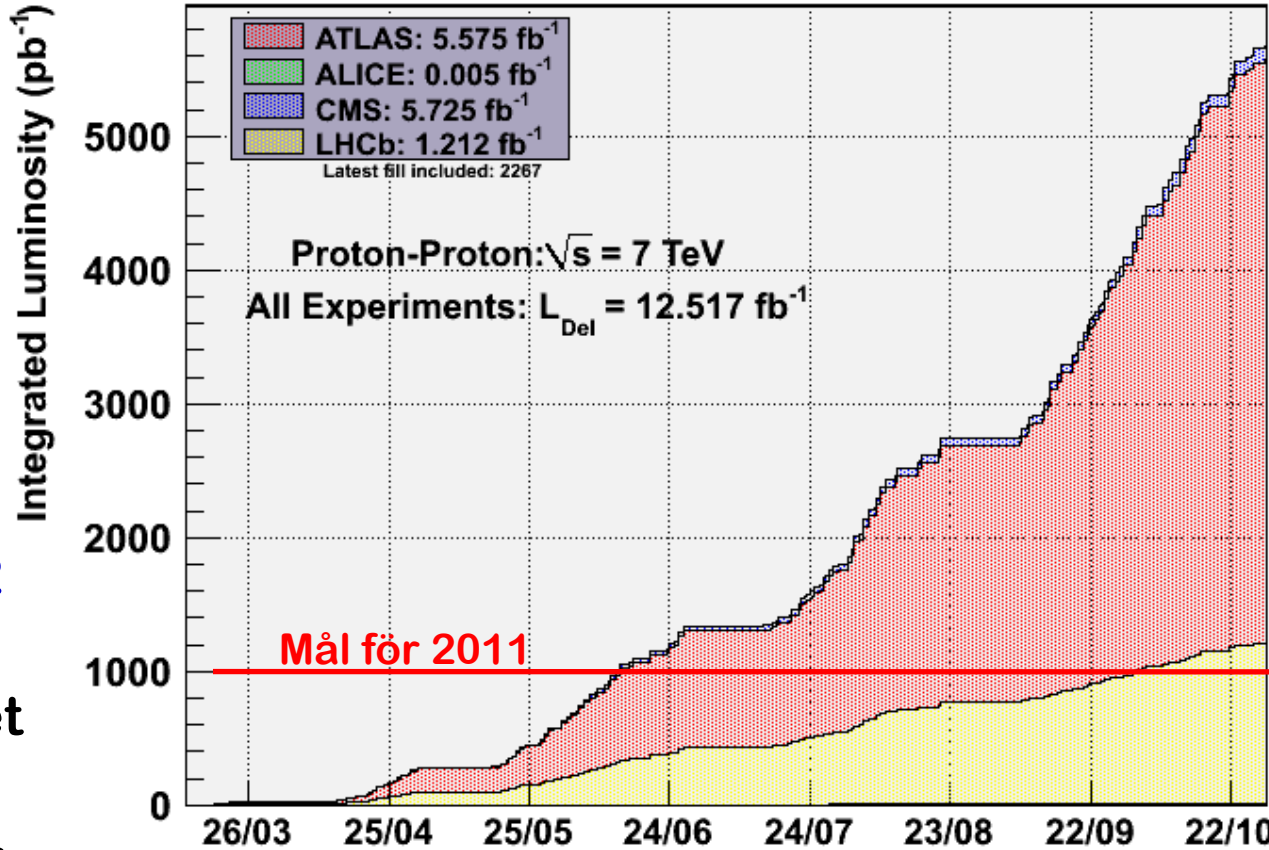
⇒ faktor 2.25-3.5  
högre luminositet  
2011 jämfört med  
2010.

⇒ ytterligare faktor  
faktor 1.7 högre 2012

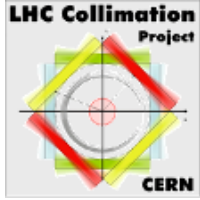
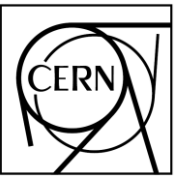
- Årsmål för 2011 i integrerad luminositet uppnått redan i juni.

- En av många faktorer som gjort att experimenten redan nu kunnat hitta Higgs!


## 2011 Luminosity Production

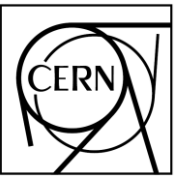




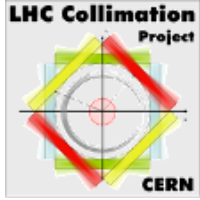


# Outline

- **Introduktion: LHC**
- **Simuleringar av kollimeringsystemet i LHC**
- **Simuleringar av bakgrund i ATLAS och CMS från kollimering**
- **Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna för att maximera luminositeten**
-  • **Strålförluster orsakade av elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande  $\text{Pb}^{82+}$  joner**

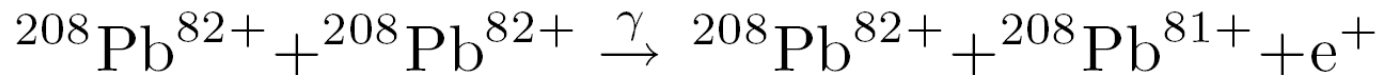


# Elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande $\text{Pb}^{82+}$



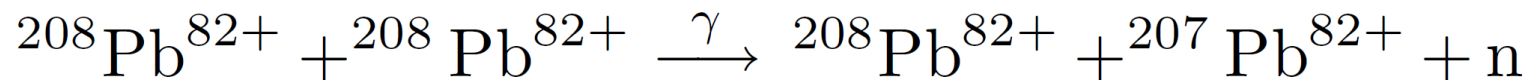
- Under körning med  $\text{Pb}^{82+}$  (inga elektroner kvar!) i LHC sker s.k. ultra-perifera elektromagnetiska interaktioner mellan krockande strålar i kollisionspunkten:

- **Bound Free Pair production (BFPP,  $\sigma=281$  barn):** *Meier et al. Phys. Rev. A, 63, 032713 (2001)*



- **1-neutron Electromagnetic dissociation (EMD1,  $\sigma= 96$  barn)**

*Pshenichnov et al. Phys. Rev. C 64, 024903 (2001)*

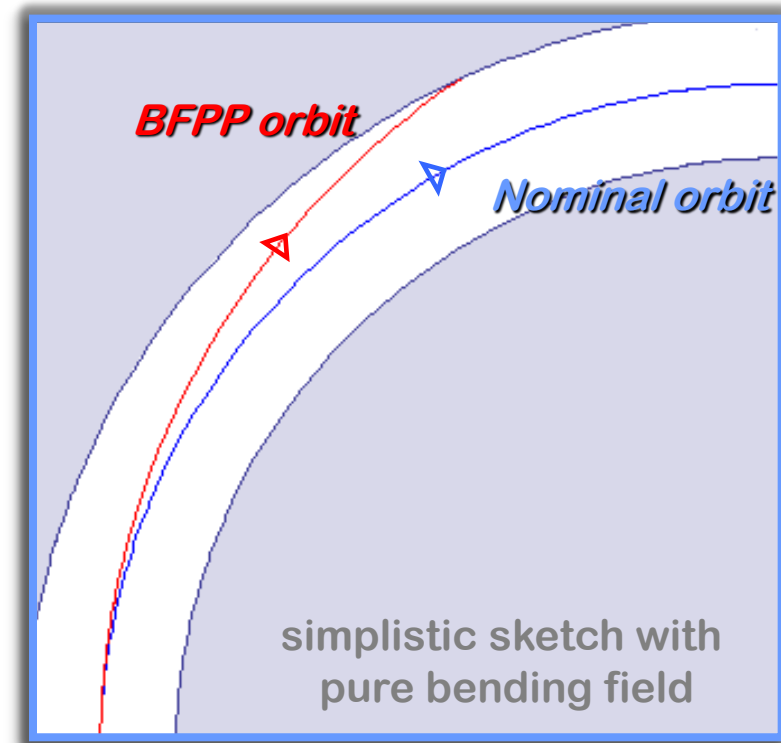


- **2-neutron Electromagnetic dissociation (EMD2,  $\sigma= 29$  barn)**

**Jämför:  $\sigma_{\text{hadr}}=8$  barn**

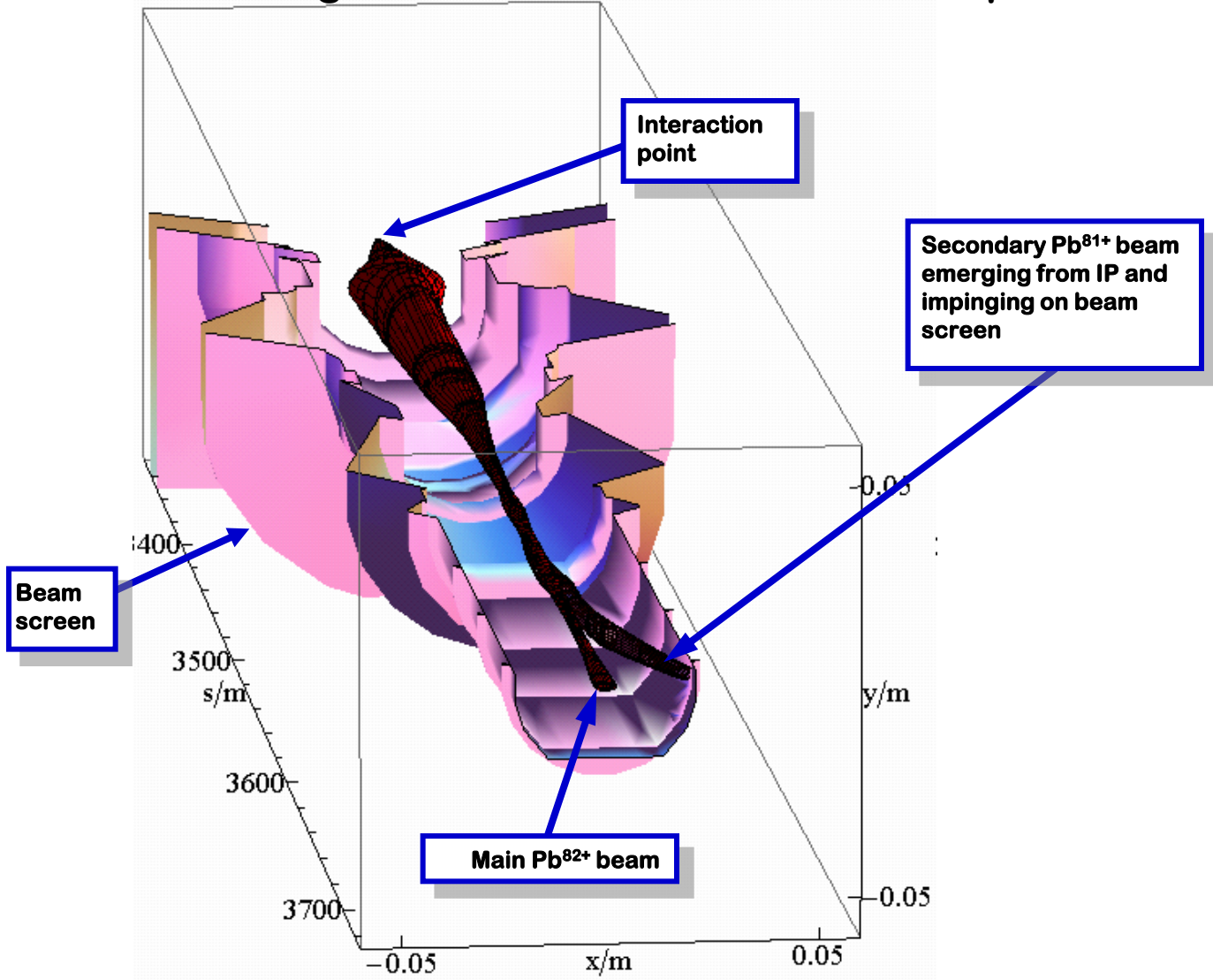
- Alla dessa processer skapar strålförluster!

- Joner som genomgått BFPP och tagit upp en elektron har en annan laddning än huvudstrålen men ungefär samma massa.
- De en annan krökningsradie i böjmagneterna pga förhållande massa/laddning
- Skillnaden är tillräckligt stor för att de ska träffa insidan av strålpipen.
- Många partiklar träffar på samma ställe  $\Rightarrow$  **uppvärmning och möjlig quench av supraledande magnet!**



# Strålbana för Pb<sup>81+</sup>

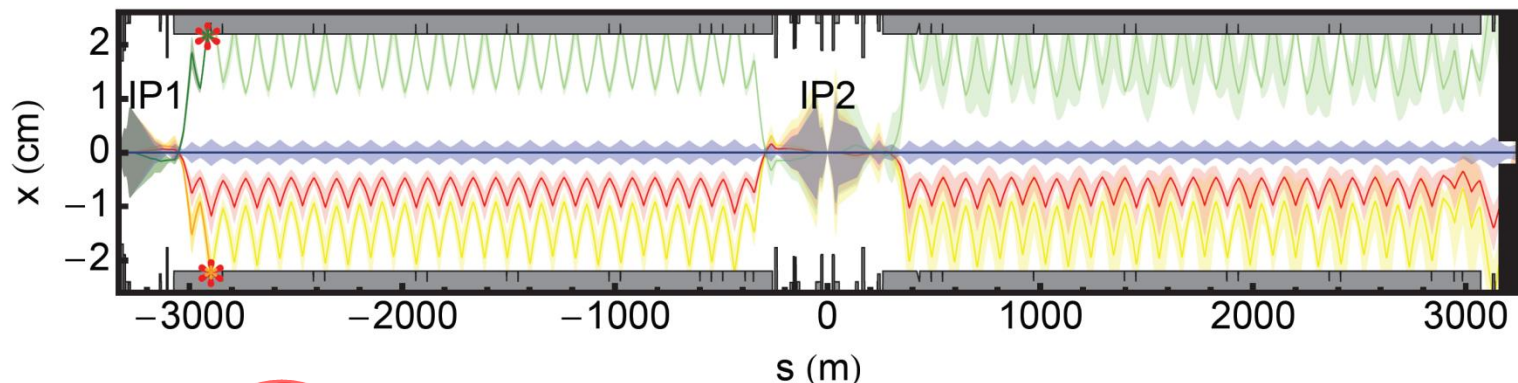
Exempel: Datorberäkning av BFPP-strålen ut ur ALICE experimentet



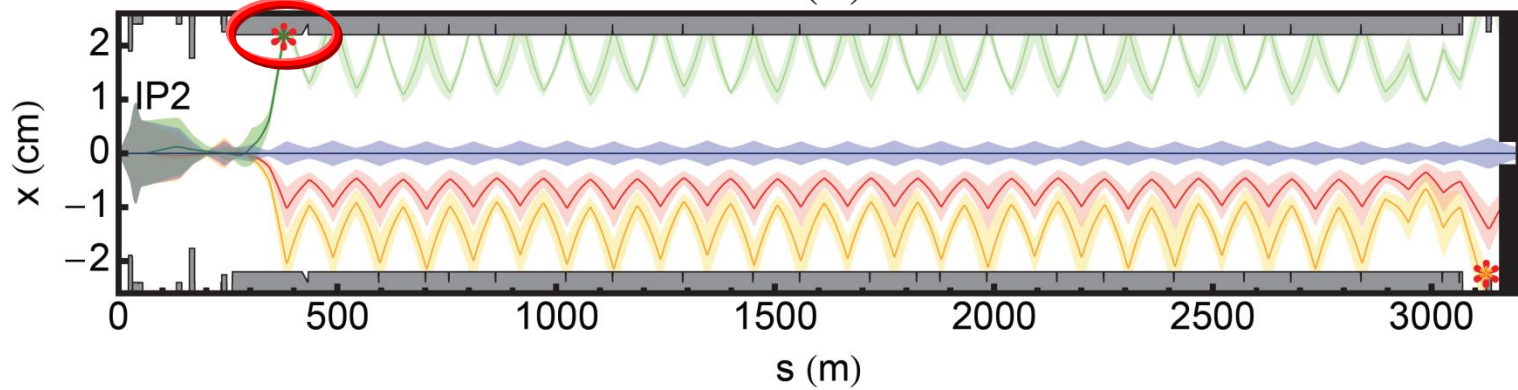




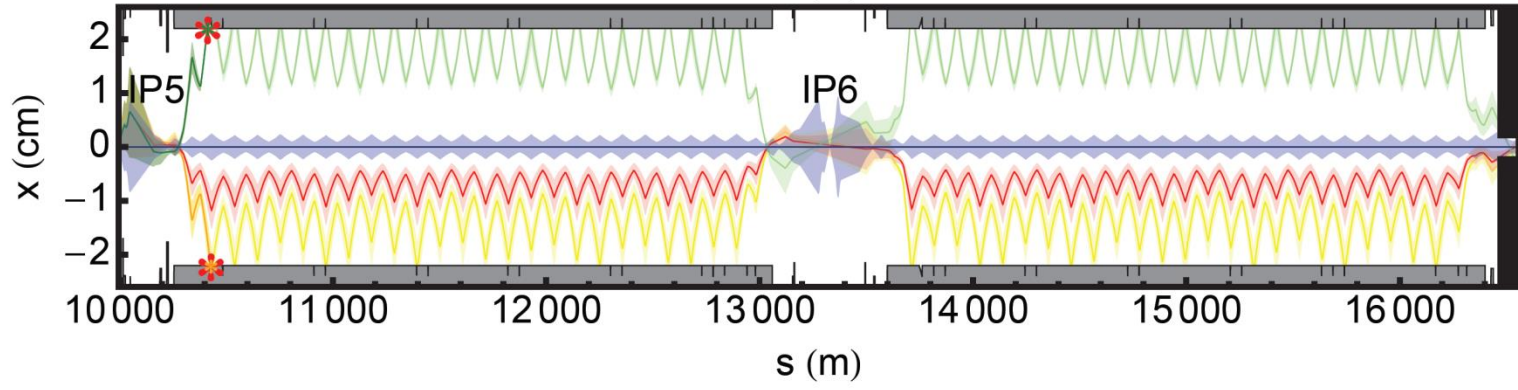
# Elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande Pb<sup>82+</sup>



- Nom.
- BFPP  $\delta=0.012$
- EMD1  $\delta=-0.0048$
- EMD2  $\delta=-0.0096$



Acceptance:  
 $|\delta| < 0.006$



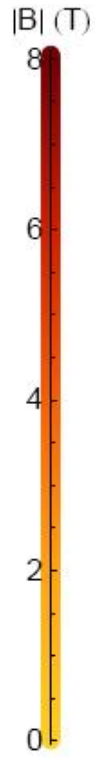
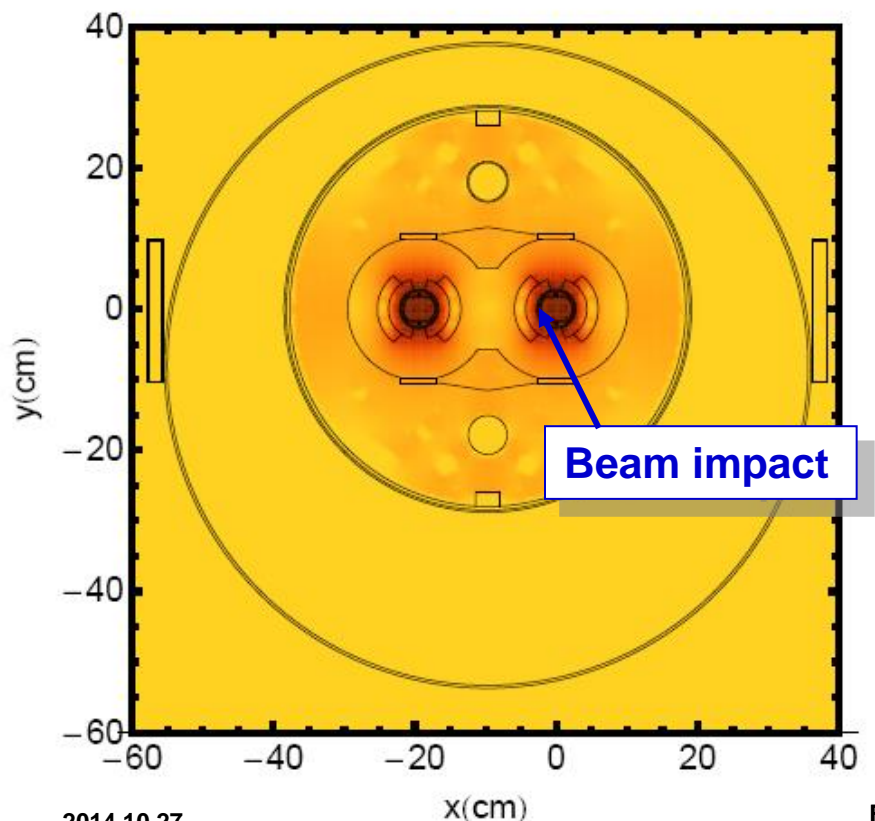
collimators  
Beam direction →

# Simulering i 3 steg

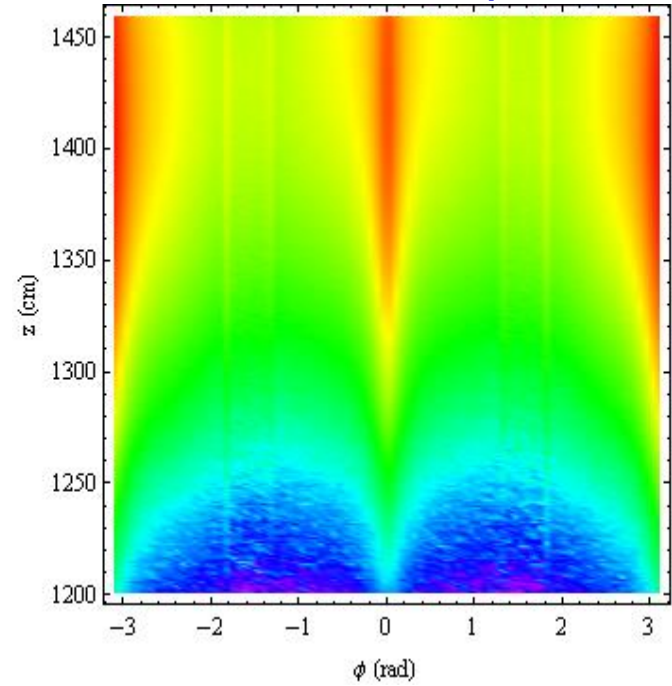
- Simulering av uppvärmning i 3 steg för att uppskatta risken för quench:

1. "Tracking" i magnetfältet från kollisionspunkten tills partiklarna träffar insidan av strålpipan i supraledande magnet (föregående slide)

2. Simulering av showern i FLUKA ger deposition av energi i magneten.  
Total effekt: ~25W



$$P_{tot} = \sigma_{BFPP} \mathcal{L} E_{particle}$$

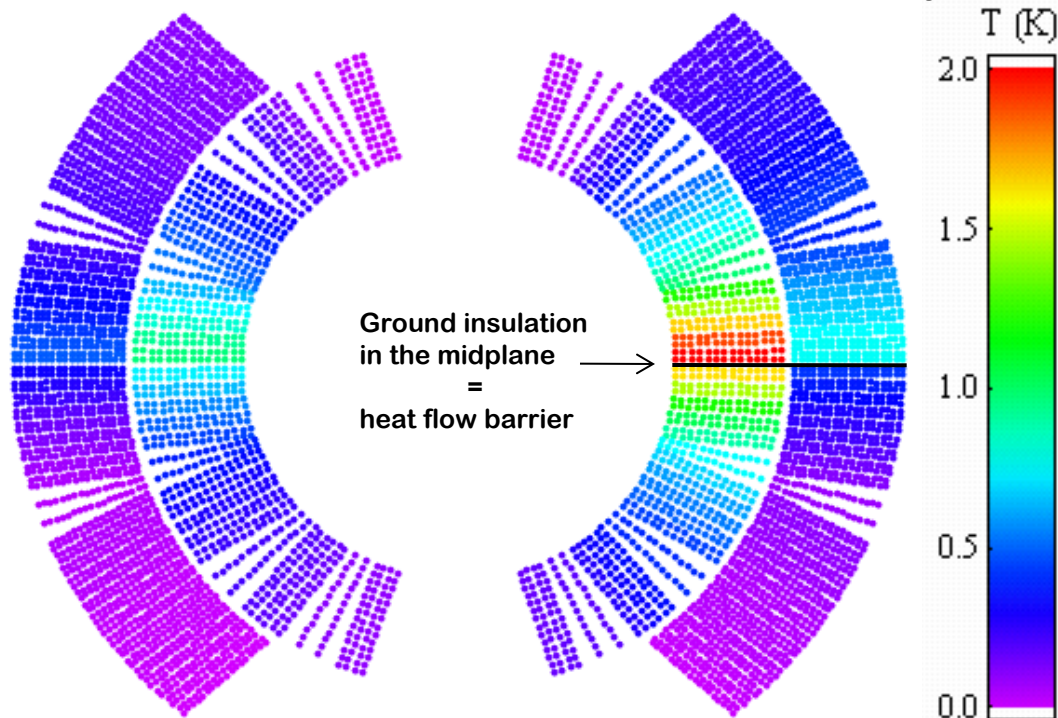


3. Termisk nätverkssimulering av värmeflödet och kylsystemet (D. Bocian) ger resulterande temperaturprofil i supraledarna som kan jämföras med quench-gränsen

**SLUTSATS 2009: För design-parametrar för Pb<sup>82+</sup> joner i LHC är den förväntade temperaturökningen i den träffade magneten över quench-gränsen!**

**Nya rön 2012: Energi-deposition korrekt, men quench-gränsen för magneten är underskattad. Vi kan köra jon-kollisioner med design-parametrar! Men: vi riskerar problem vid LHCs uppgradering i framtiden!**

Temperature map in the MB dipole magnet coil after heat load  
*Simulation by D. Bocian*



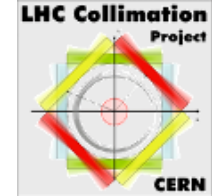
Peak temperature rise in the coil  $\Delta T = 2.0$  K  
Peak temperature rise in the cold bore  $\Delta T = 1.4$  K

For nominal LHC ion beam conditions  
(beam optics ver. 6.500)

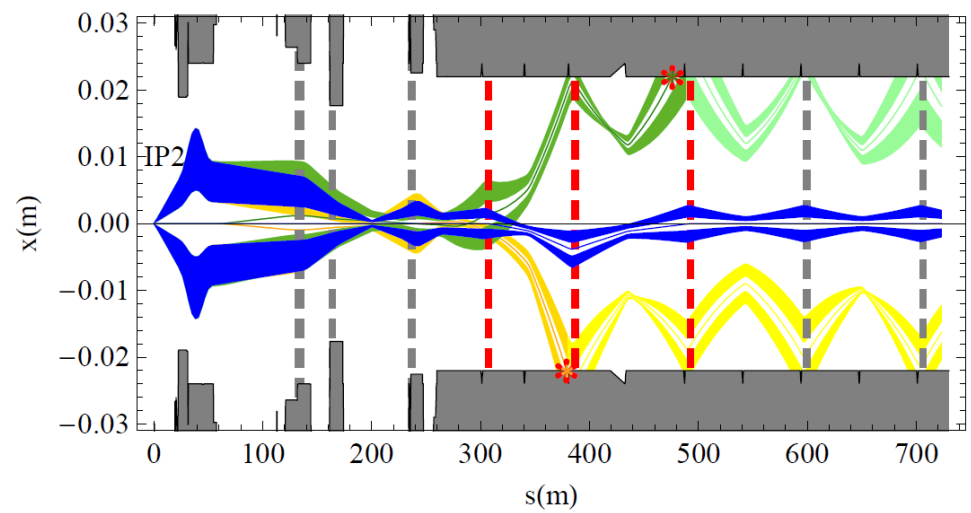
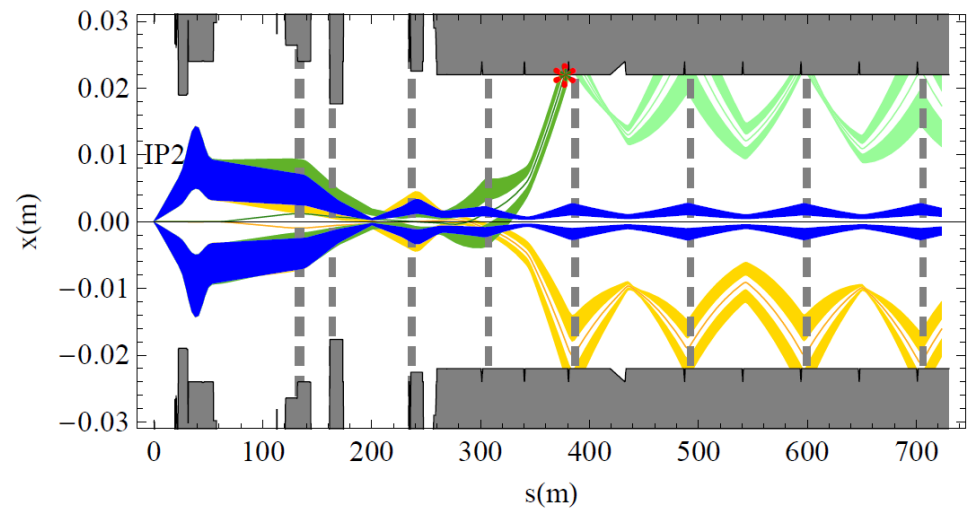




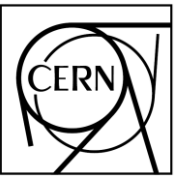
# Lösningar?



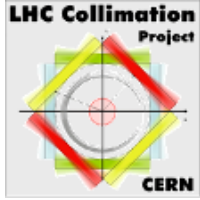
- Osäkerheten i hela simuleringskedjan gör att vi kan inte säkra på att det blir någon quench (men det kan bli värre också!)
- Förlusterna kan flyttas och spridas ut genom att ändra magnetfälten efter kollisionspunkten
- Extra kollimatorer som installeras framför magneterna
- Lägre energi (högre quench-gräns och större stråle)
- Lägre luminositet: sista utväg







# Slut



- **Tack till:** G. Arduini, R. Assmann, S. Aumon, M. Blaskiewicz, G. Bellodi, V. Boccone, C. Bracco, H.H. Braun, D. Bocian, F. Burkart, M. Cauchi, F. Cerutti, B. Dehning, R. DeMaria, A. Drees, M. Eriksson, S. Fartoukh, A. Ferrari, W. Fischer, S. Gilardoni, M. Giovannozzi, B. Goddard, W. Herr, B. Holzer, M. Huhtinen, J-B. Jeanneret, J. Jowett, S.R. Klein, W. Kozanecki, M. Magistris, A. Mereghetti, L. Ponce, S. Redaelli, G. Robert-Demolaize, A. Rossi, B. Schröder, G.I. Smirnov, M. Stockner, S. Tepikian, G. Valentino, V. Vlachoudis, E. Wallén, T. Weiler, S. White, J. Wenninger, D. Wollmann, C. Zamanzas, F. Zimmermann
- För mer info: se publikationer på [www.cern.ch/rbruce](http://www.cern.ch/rbruce)
- **Frågor?**