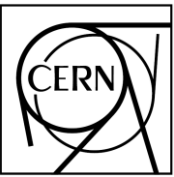


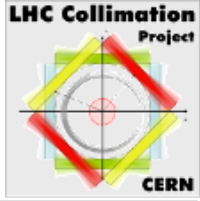
Projects performed by a Swedish student/fellow/staff

Roderik Bruce

CERN - BE/ABP, Geneva, Switzerland



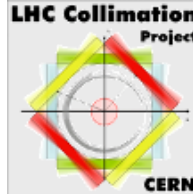
Outline



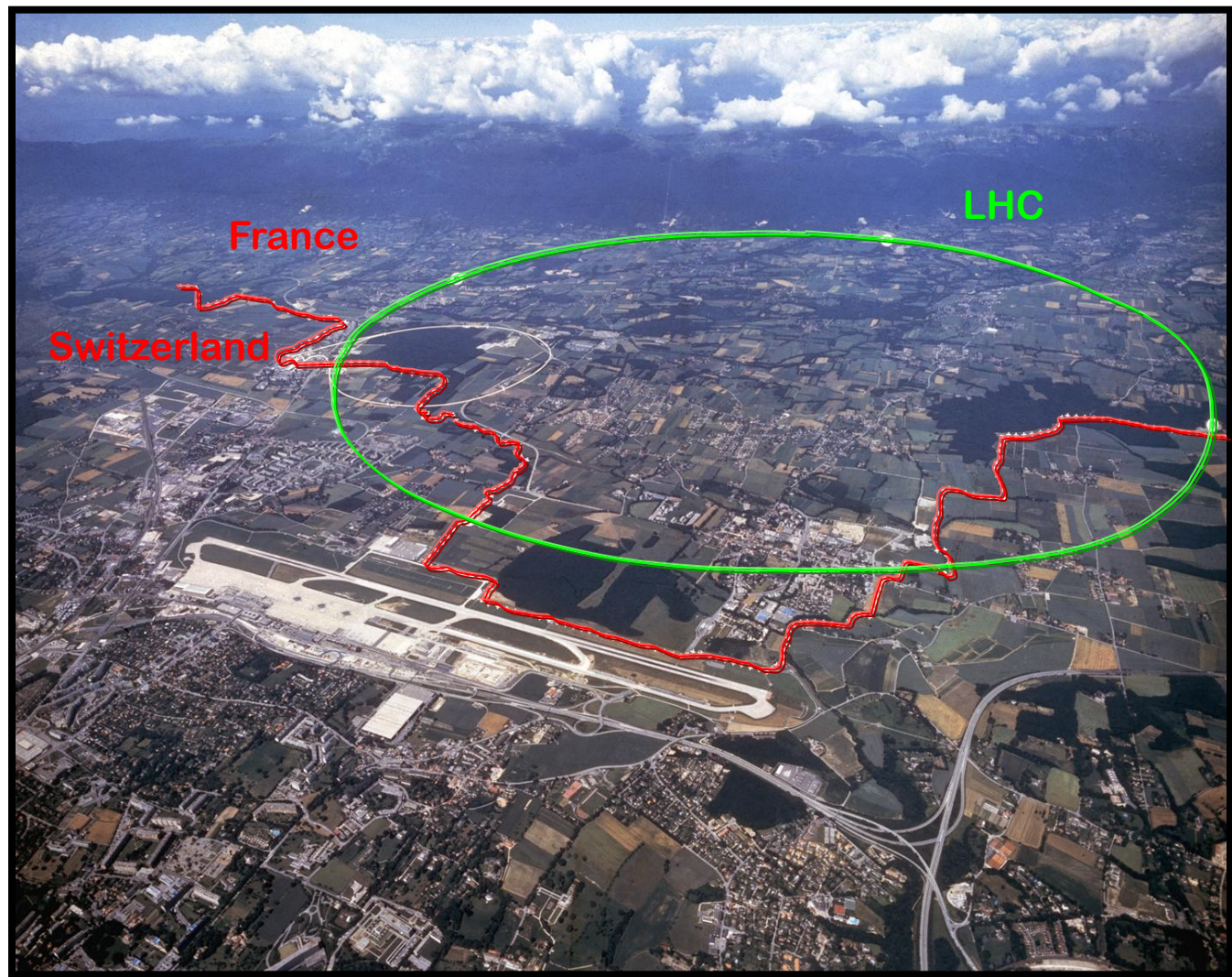
- **Introduktion: LHC**
- **Simuleringar av kollimeringsystemet i LHC**
- **Simuleringar av bakgrund i ATLAS och CMS från kollimering**
- **Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna för att maximera luminositeten**
- **Strålförluster orsakade av elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande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

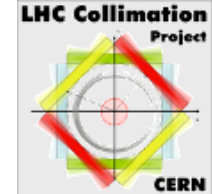


LHC (Large Hadron Collider)



- 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



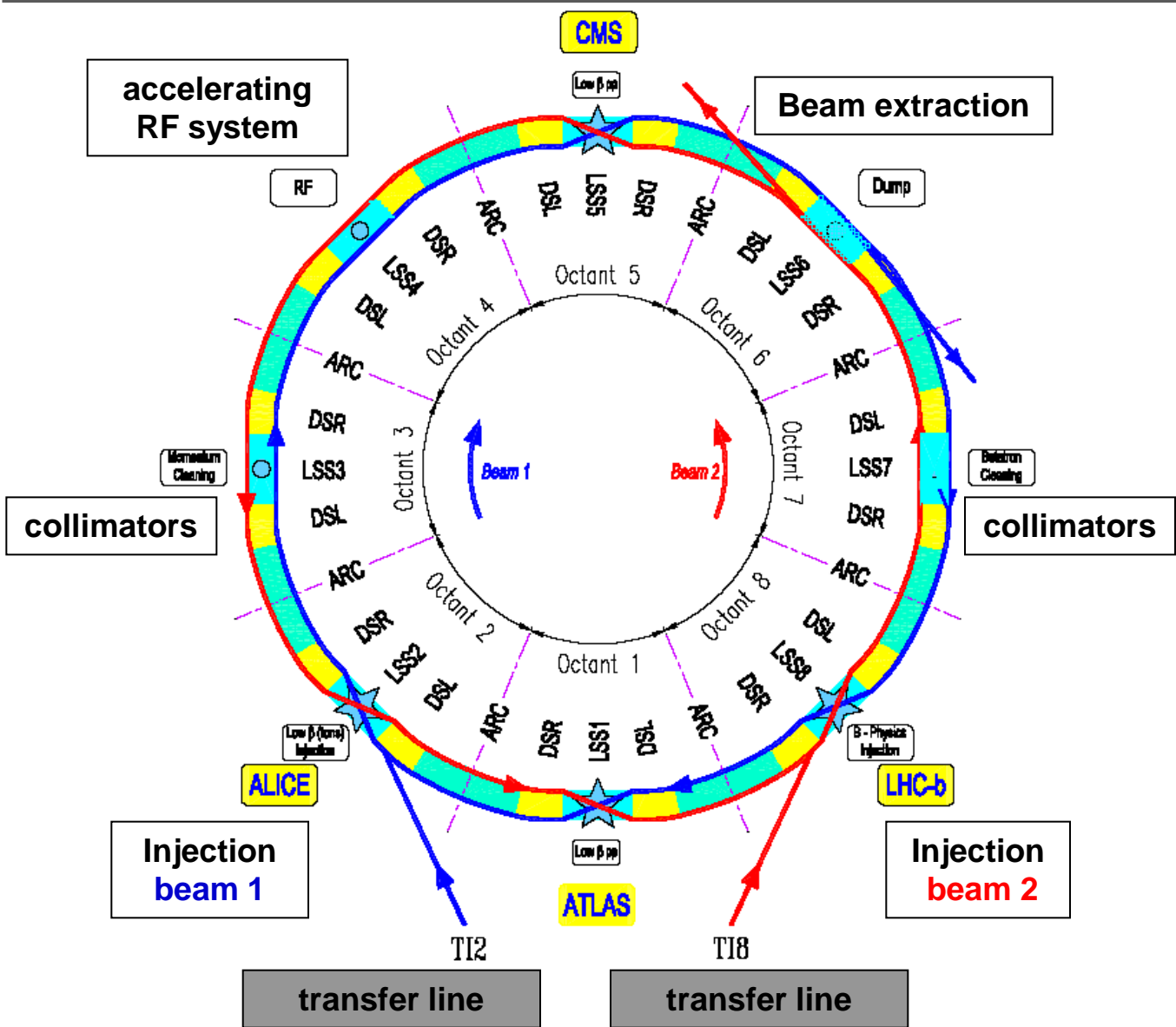


Large Hadron Collider

- 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 ⁸²⁺ 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 ⁻² s ⁻¹	1e34 cm ⁻² s ⁻¹	1e27 cm ⁻² s ⁻¹
Total energi i strålen	23 MJ	362 MJ	3.81 MJ

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



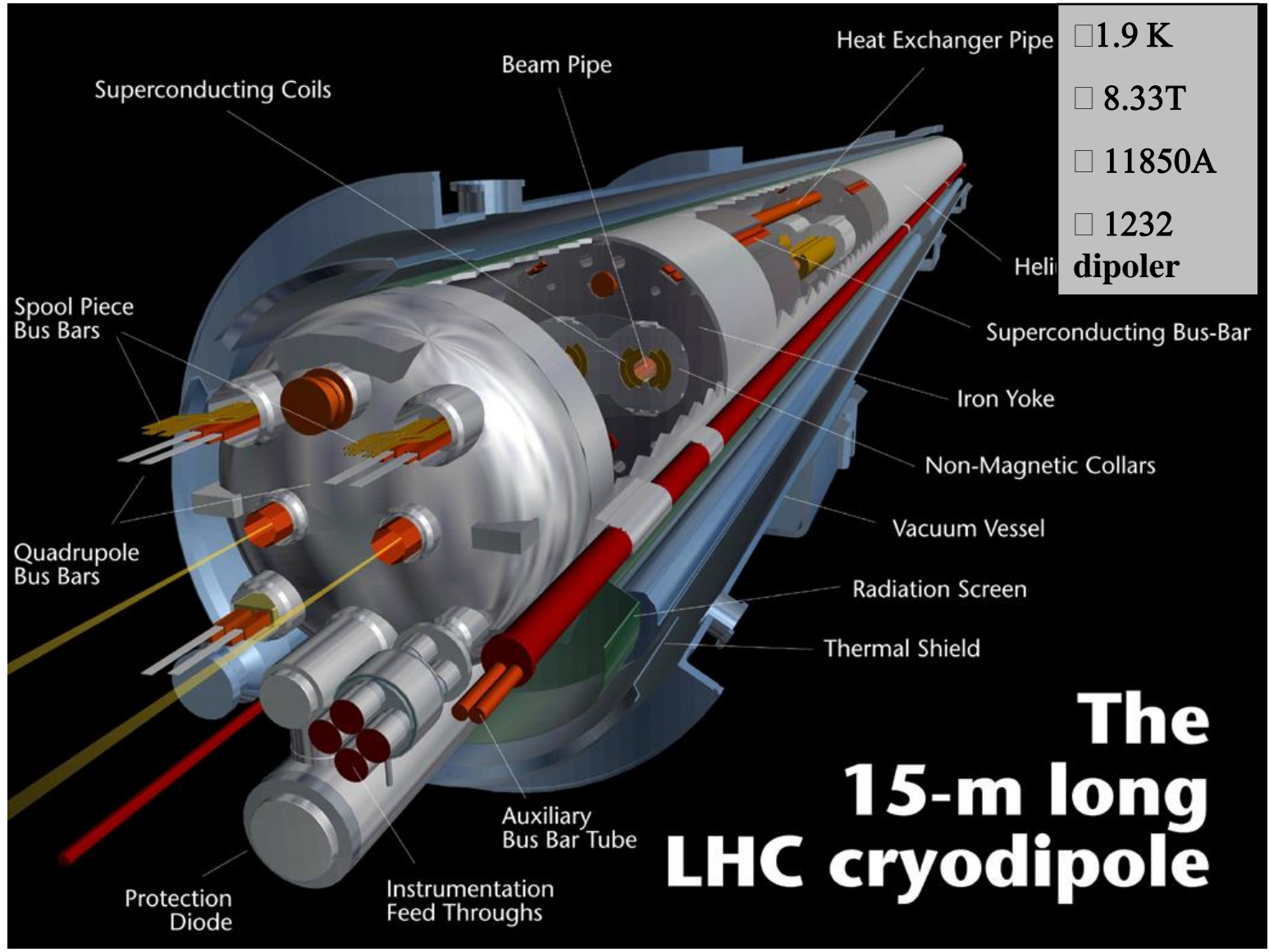
Partikelstrålar i LHC



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

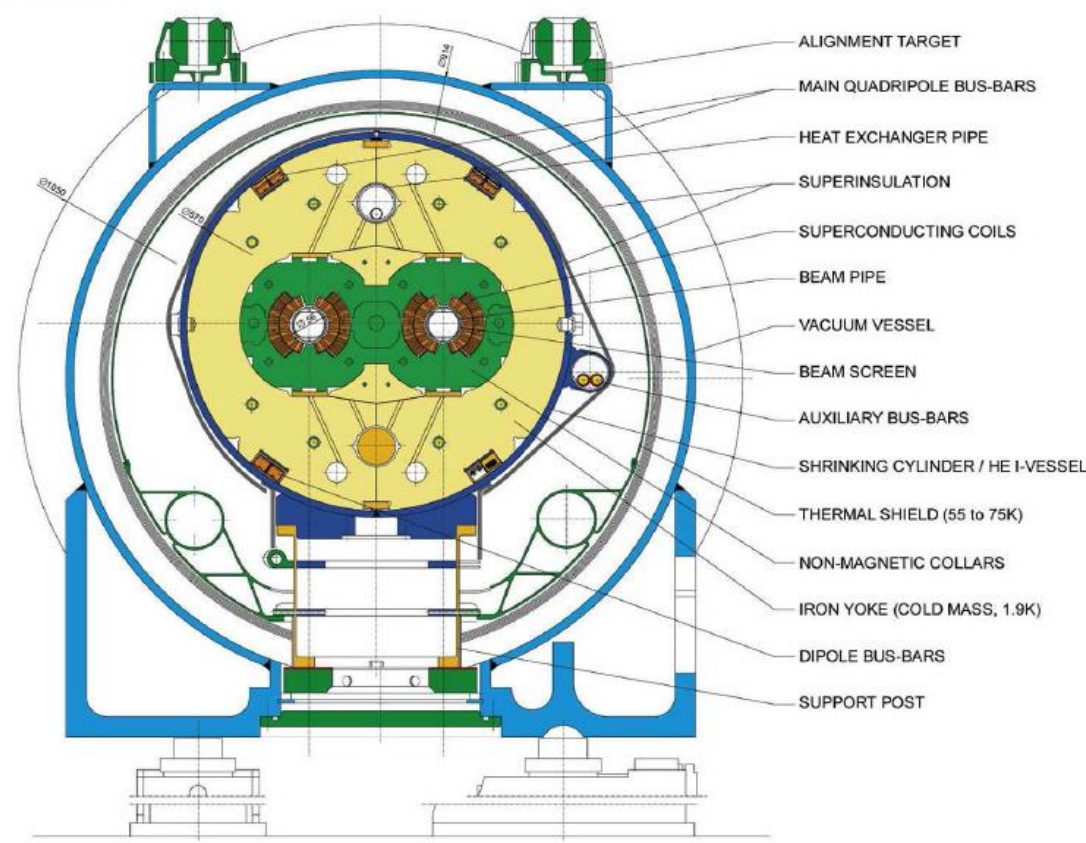


Supraleedande magneter



Quenchning av magneter

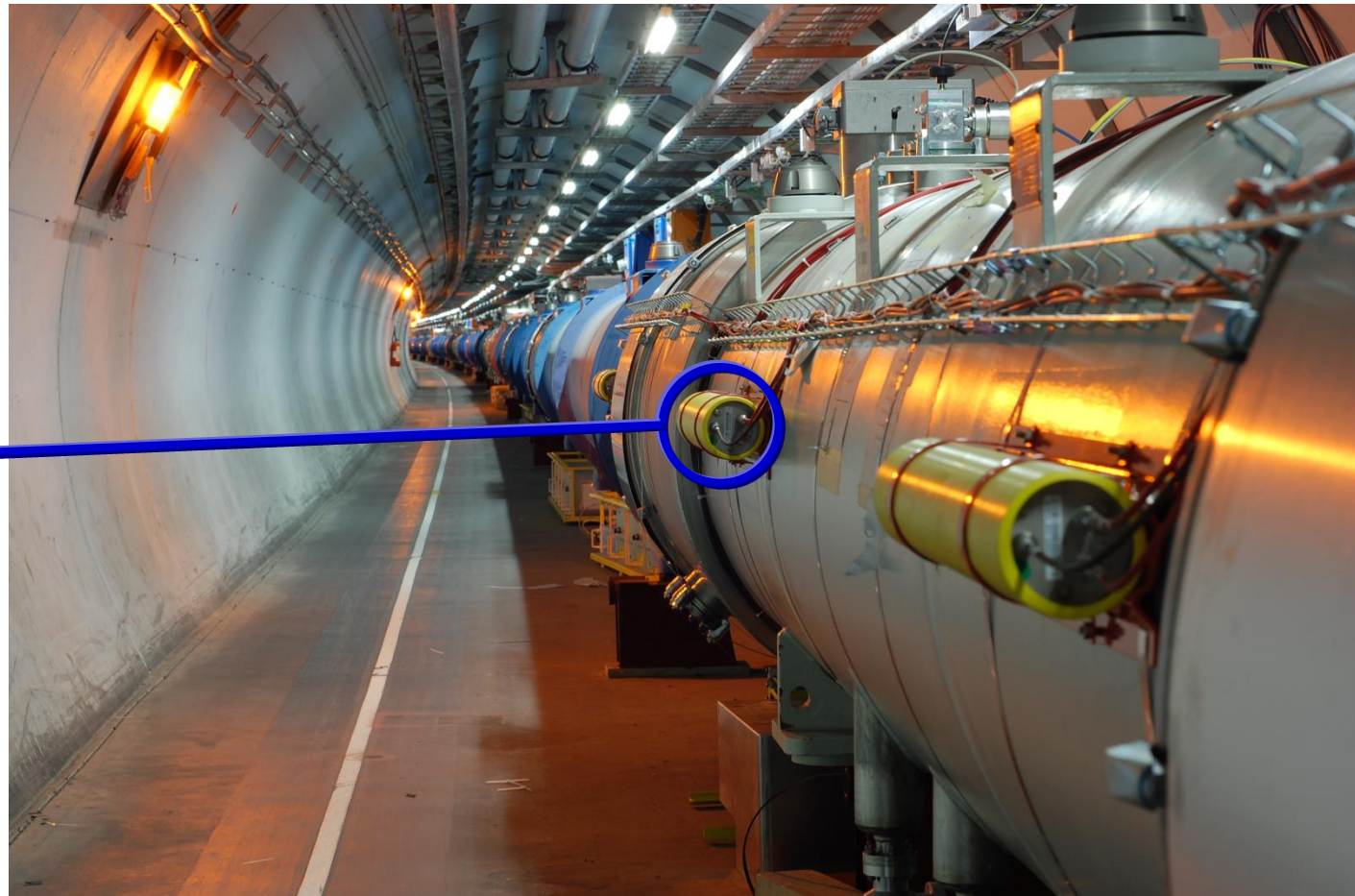
- 9300 magneter i LHC, många supraledande vid $T=1.9\text{ K}$
- Magneterna lämnar supraledande tillstånd (**quench**) om de värms upp
- Quenchar måste undvikas!
- Förluster av partiklar från strålen kan orsaka uppvärmning. Övervakas med strålförlustmonitorer (BLMs)

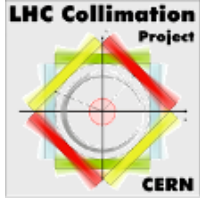
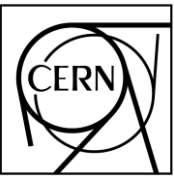


Transverse cross section of a 14.6 m LHC cryo dipole

Strålförlustmonitorer

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



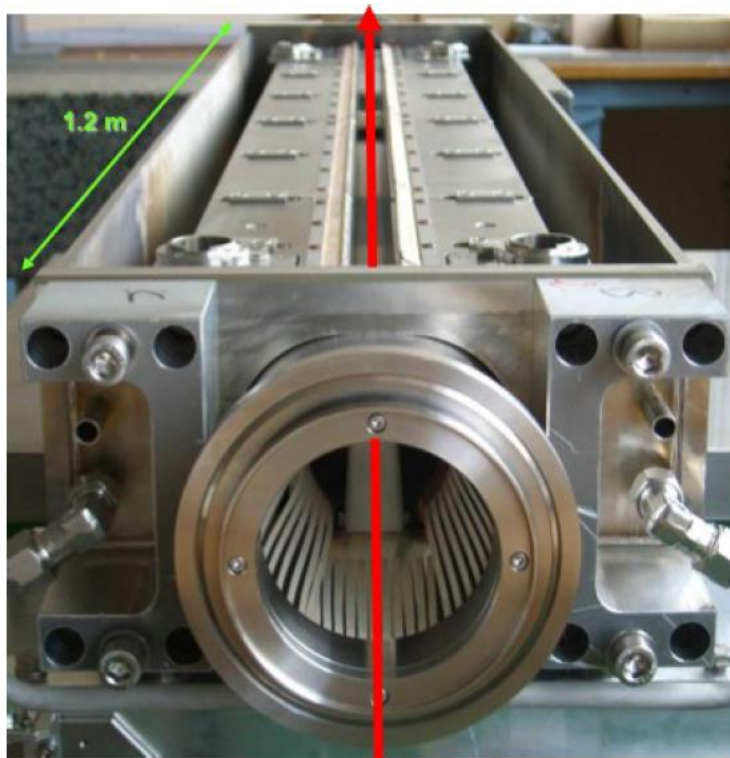


Outline

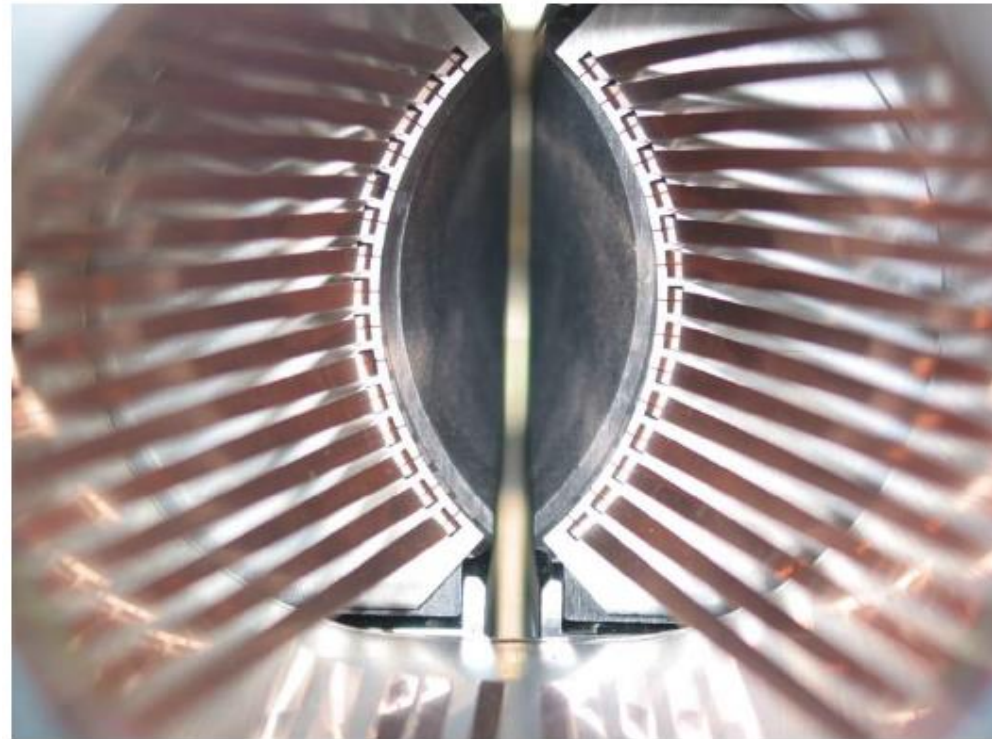
- **Introduktion: LHC**
- **Simuleringar av kollimeringsystemet i LHC**
- **Simuleringar av bakgrund i ATLAS och CMS från kollimering**
- **Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna för att maximera luminositeten**
- **Strålförluster orsakade av elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande 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



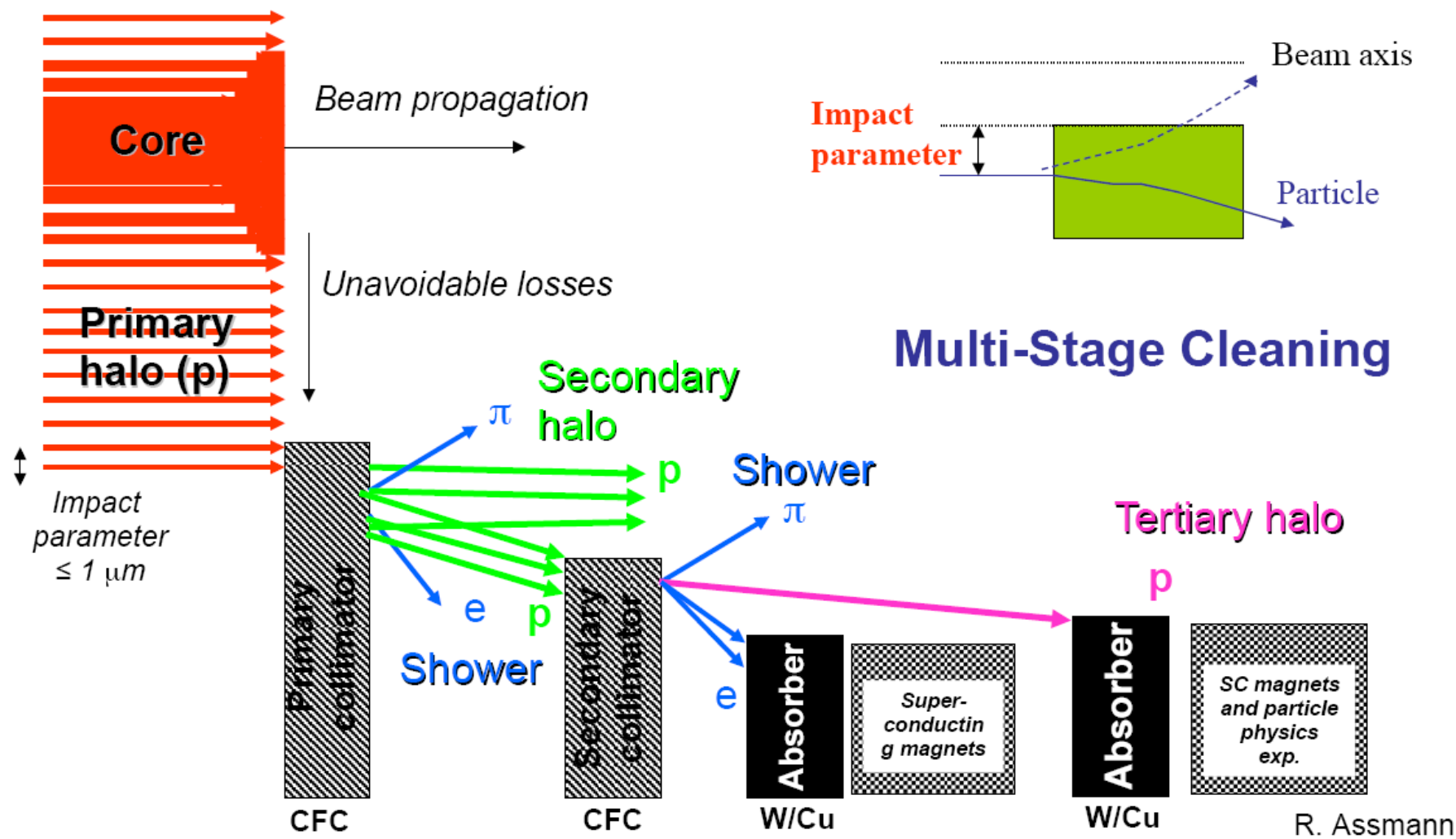
360 MJ proton beam

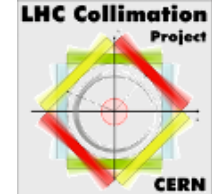


R. Bruce



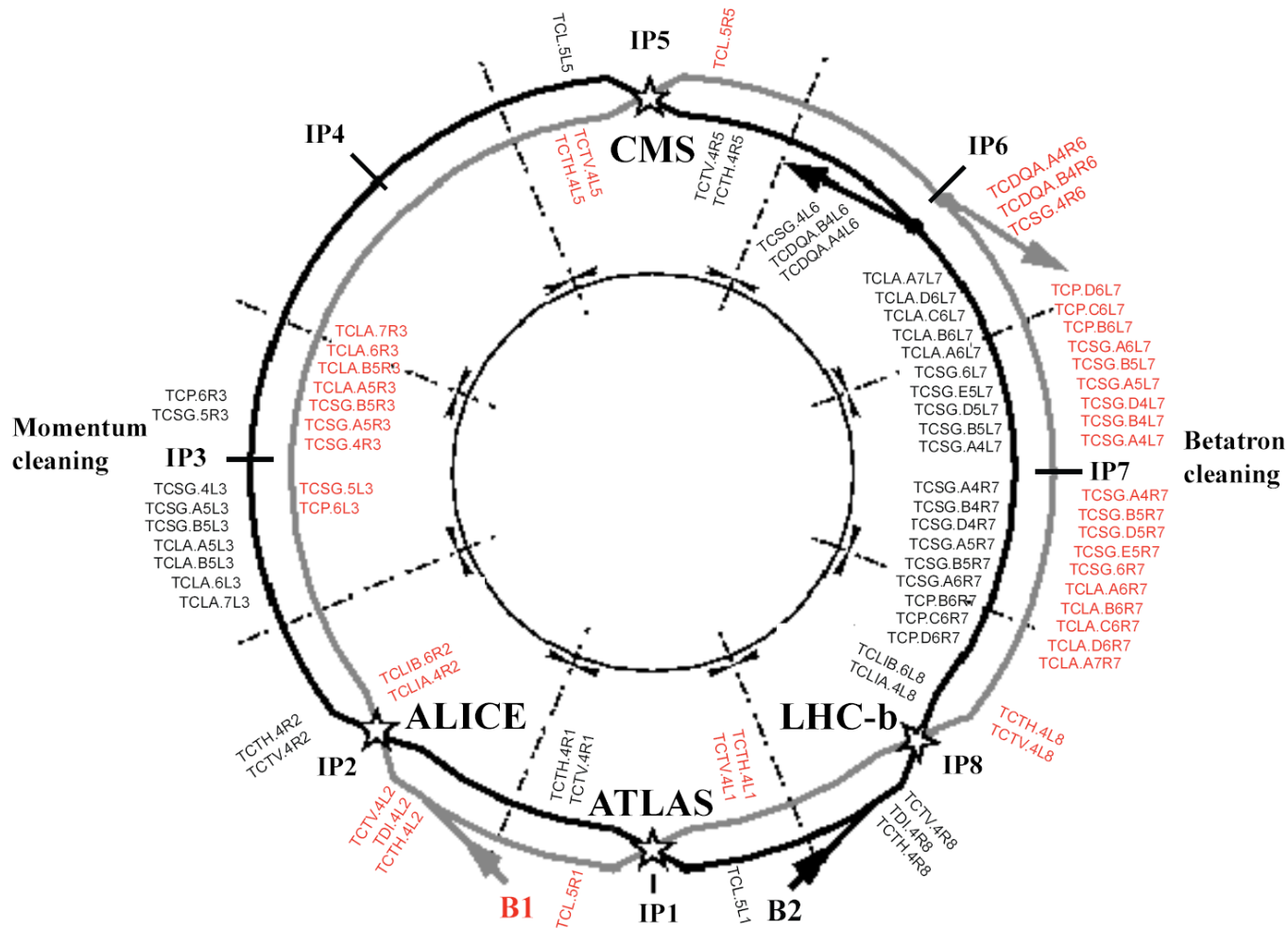
Layout för kollimeringsystemet





Simuleringar av kollimering

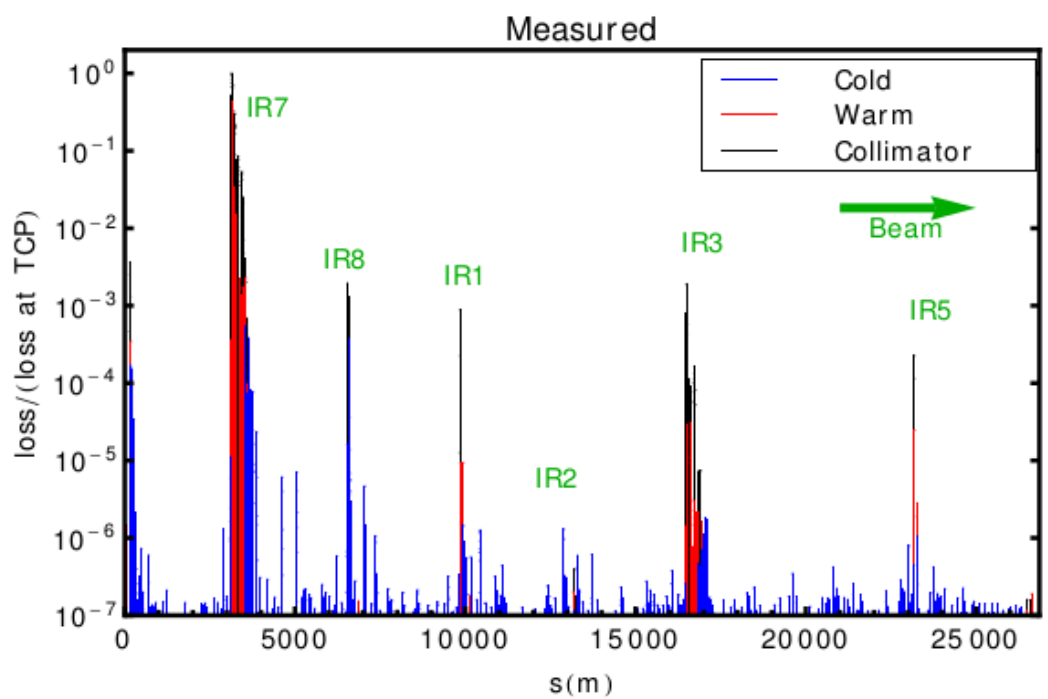
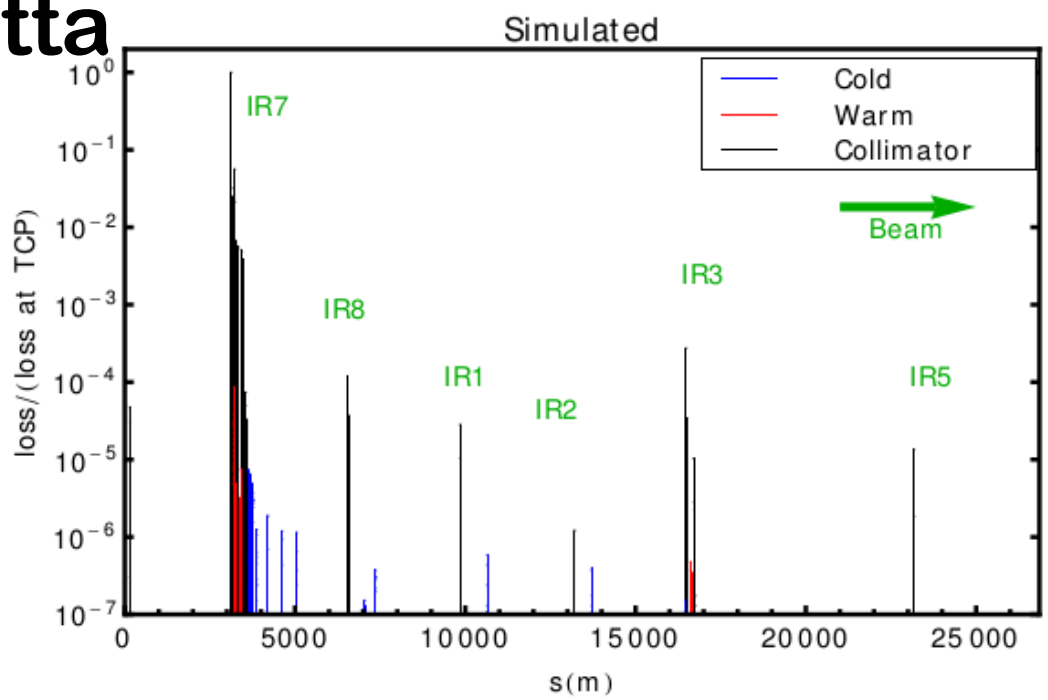
- **SixTrack:** datorprogram som varv efter varv följer banan av enskilda partiklar genom en accelerator givet ett lattice (layout av magneterna)
- Interaktion mellan protoner atomerna i kollimatorer simulerade med Monte-Carlo-rutin
- Output: distribution av strålförluster runt hela ringen





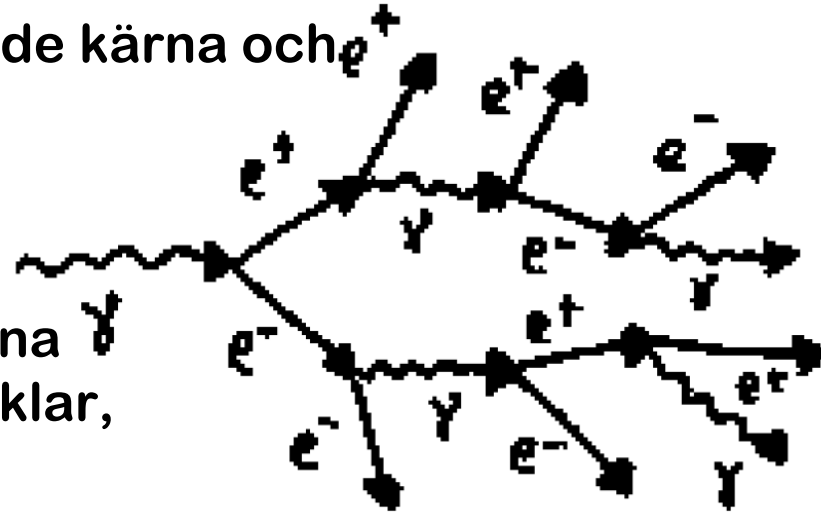
Simulerade/mätta strålförluster

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



Shower-simulering

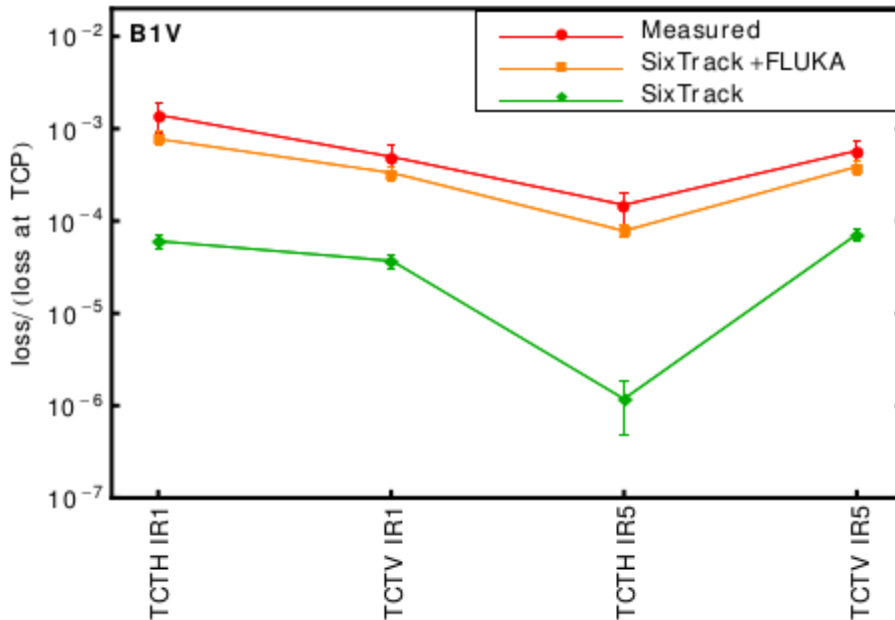
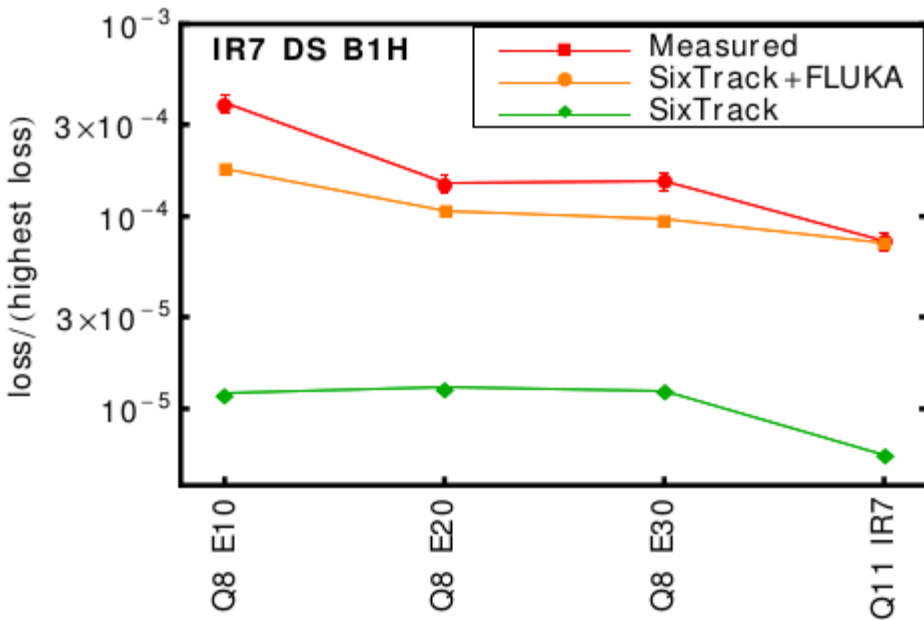
- När en hög-energetisk partikel träffar material interagerar den med atomerna, både kärna och elektroner
 - Tappar energi, ändrar riktning
 - Skapar nya partiklar
 - Kedjereaktion: de nya partiklarna skapar i sin tur ytterligare partiklar, “shower”
- “Shower” orsakad av strålförlusterna simulerad med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

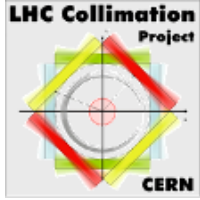
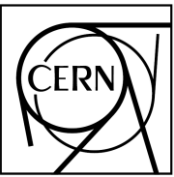





Simulerade/mätta strålförluster

- 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



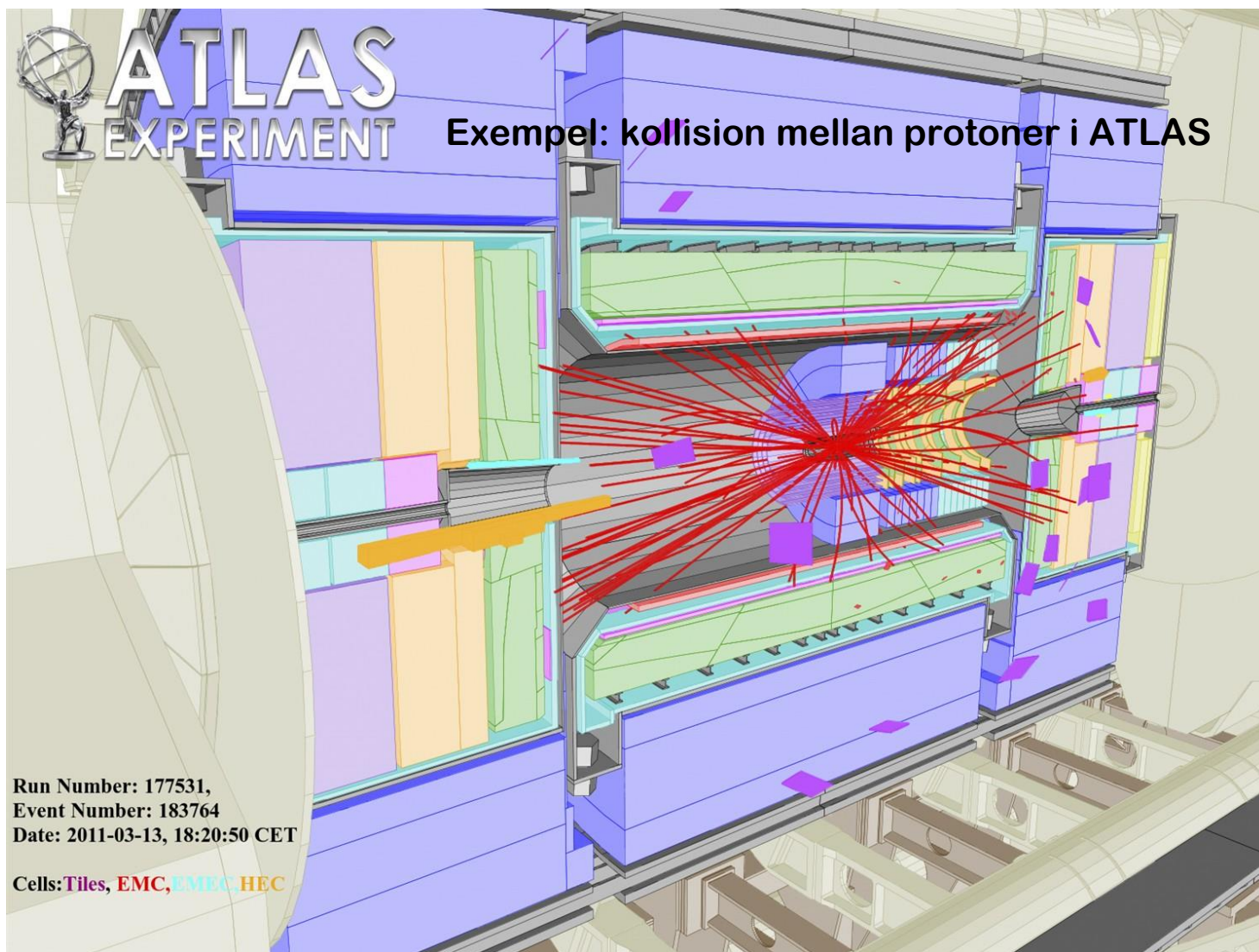


Outline

- **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 Pb^{82+} joner**

Bakgrund i detektorerna

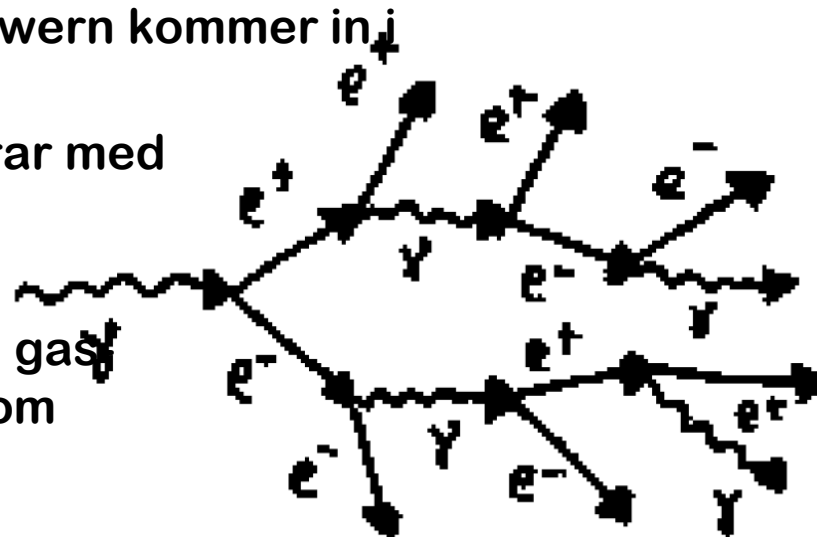
- Varje spår är en partikel
- Partiklar kan komma in utifrån och skapa oönskad signal (bakgrund)
- Liknande processer inträffar då en proton träffar atomerna i ett material
- Shower från strålförluster nära detektorn kan orsaka bakgrund

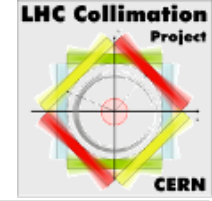




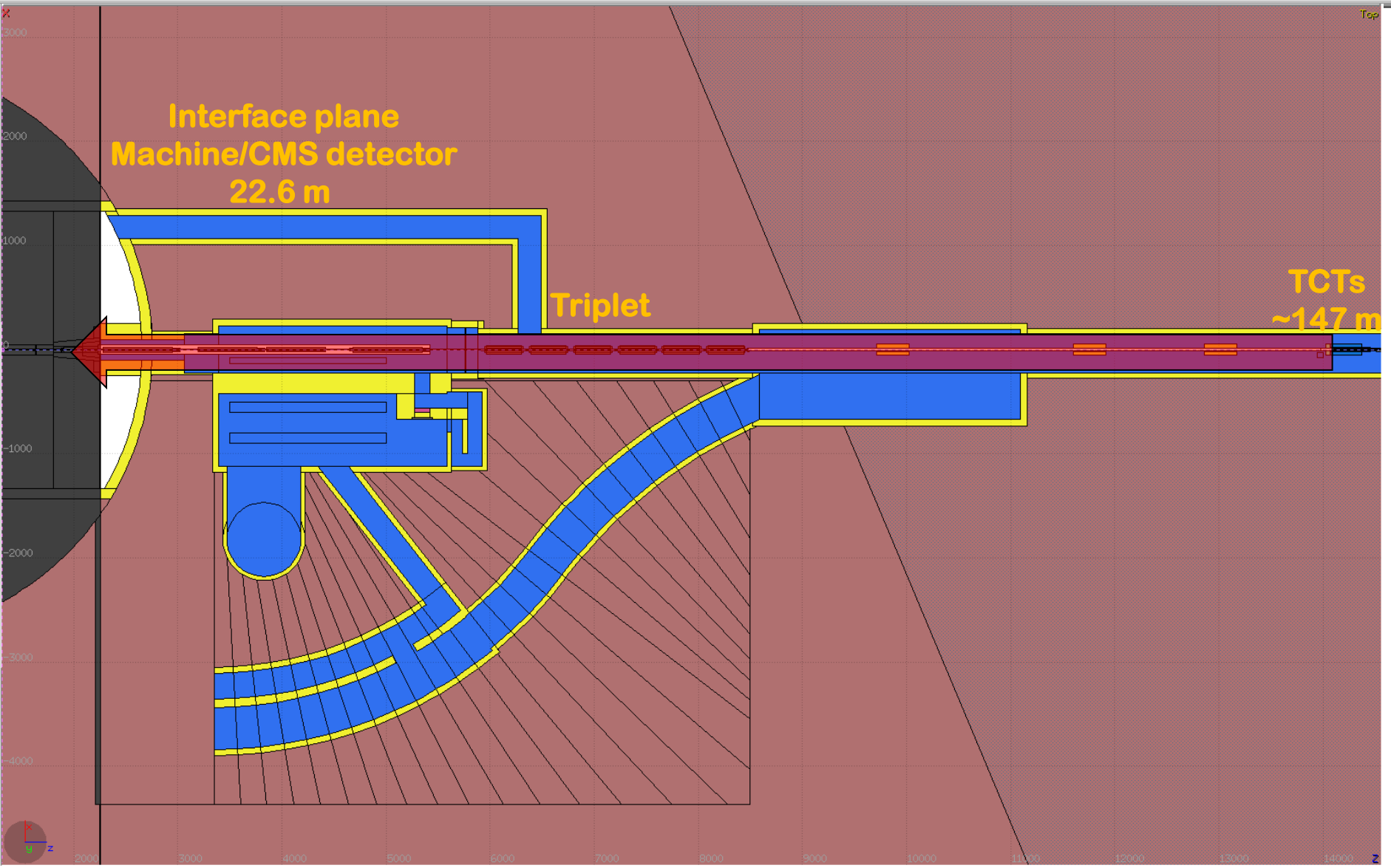
Bakgrund från kollimering och gas

- 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



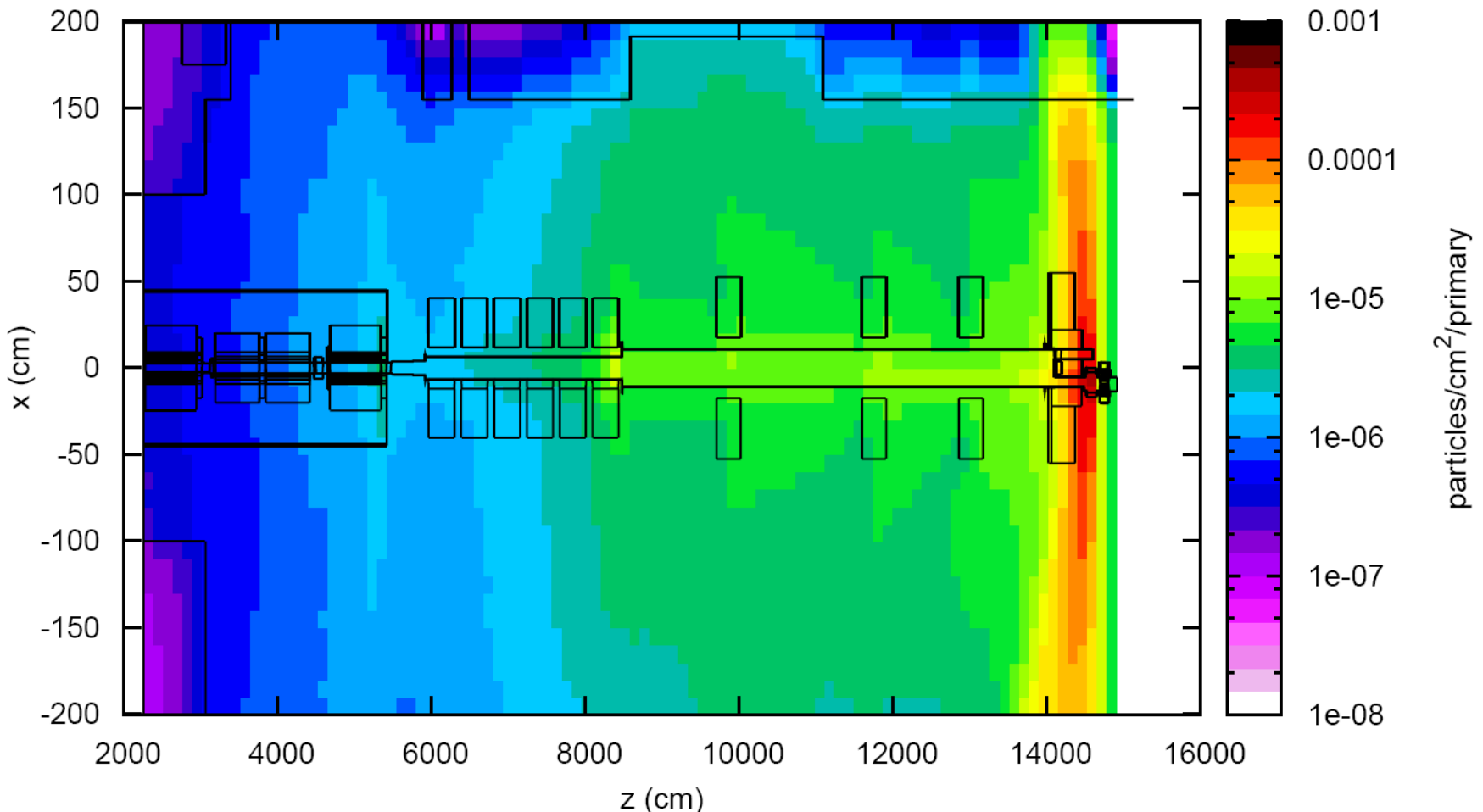


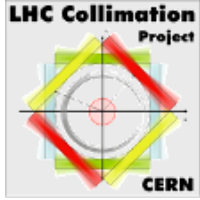
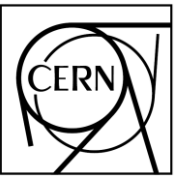
Resultat av FLUKA-simulering




- 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



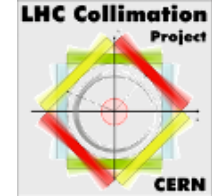


Outline

- **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 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 (points to N_B)
 Revolution Frekvensen (points to f_{rev})
 Antalet Partiklar per Bunch i Stråle 1 (points to n_1)
 Faktor för vinkeln mellan strålarna vid kollision (points to F)
 Emittansen (points to ϵ_x)
 Amplitud Funktionen, β_x , vid Kollisions Punkten (points to β_x^*)
 Storlek på strålen i kollisionspunkten (bracketed under the denominator)

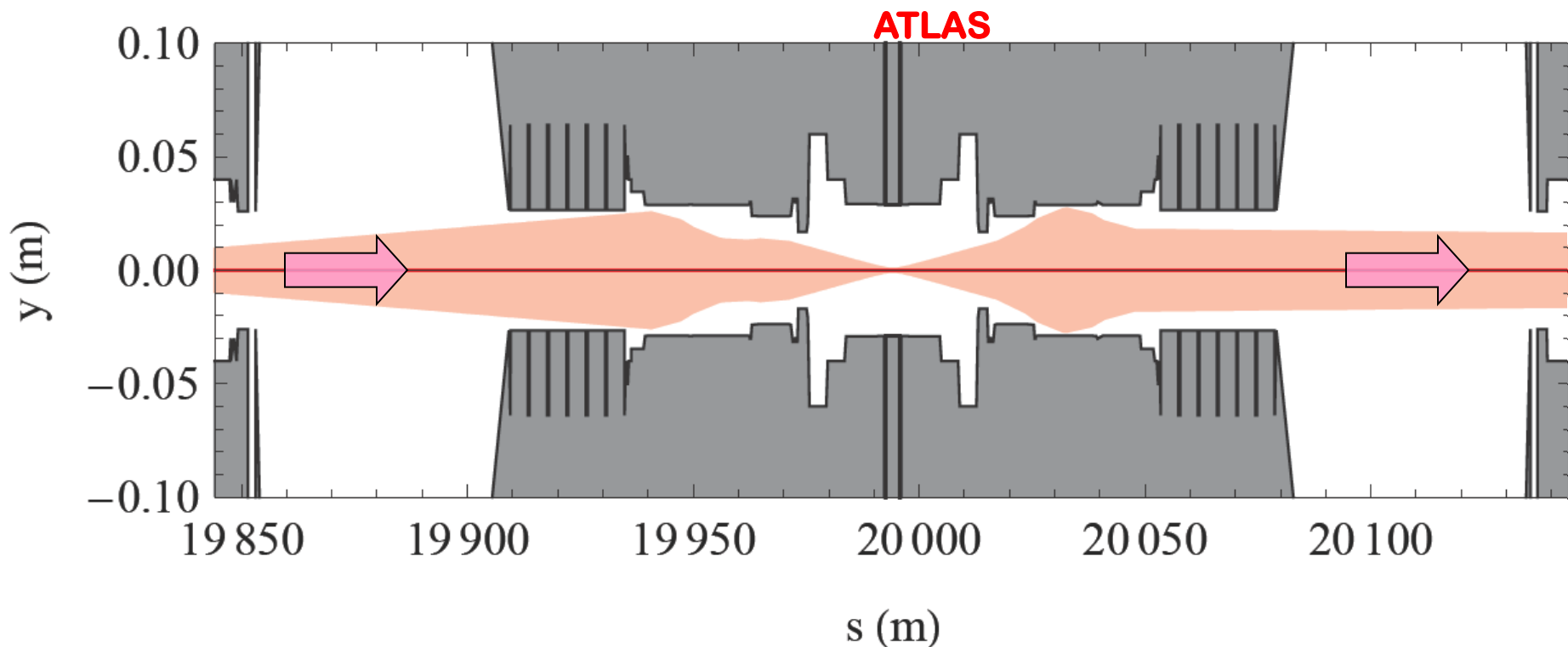
- Ju mindre strålstorlek, desto högre är partikeltätheten och sannolikheten för kollisioner när två buncher går genom varandra
- Ökad luminositet uppnås genom fler buncher, fler partiklar per bunch och mindre strålstorlek i kollisionspunkten.



Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna

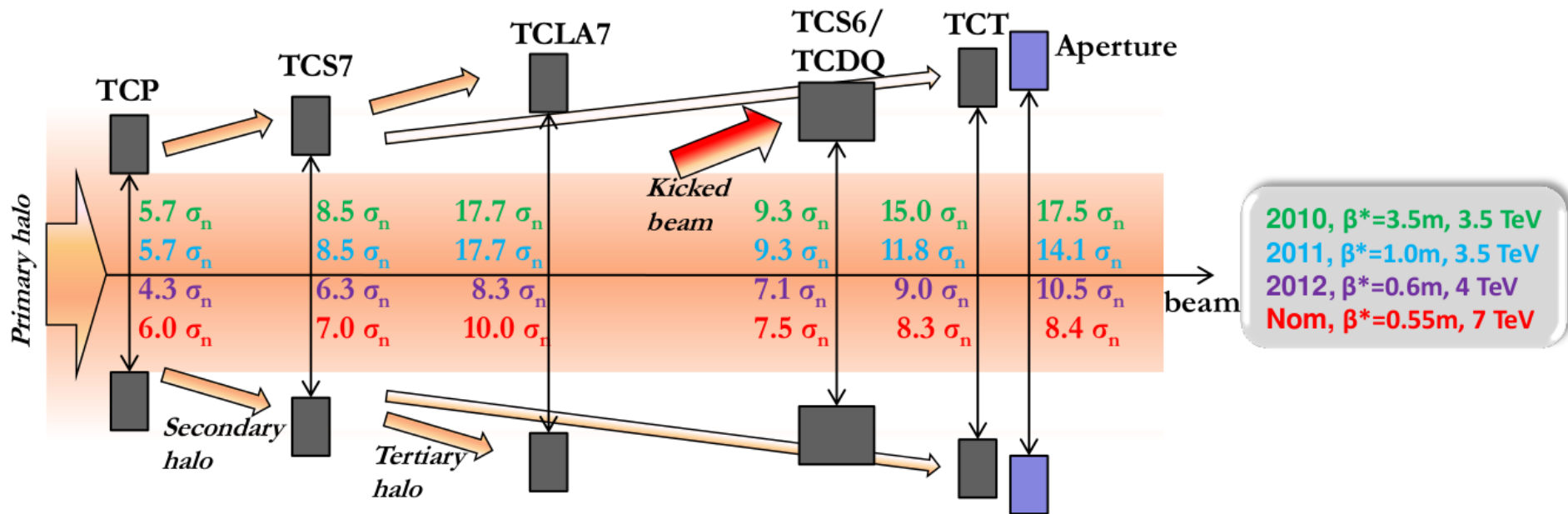


- Strålen fokuseras i kollisionspunkten av quadrupolmagneter
- Nominell strålstorlek i kollisionspunkten: $16\mu\text{m}$. Nu: ungefär $22\mu\text{m}$
- När strålen fokuseras i kollisionspunkten blir den större i tripletmagneterna
- Om strålen blir för stor där, kan oönskade strålförluster och quenchar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





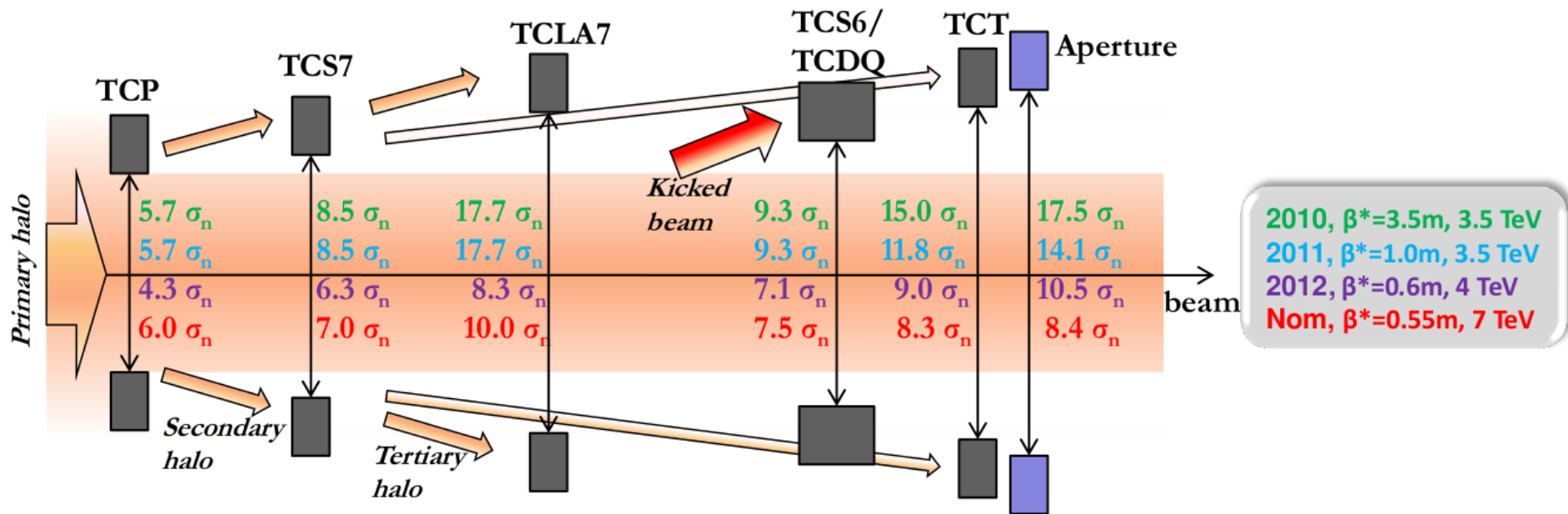
Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna



- 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



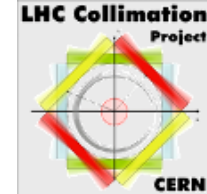
Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna



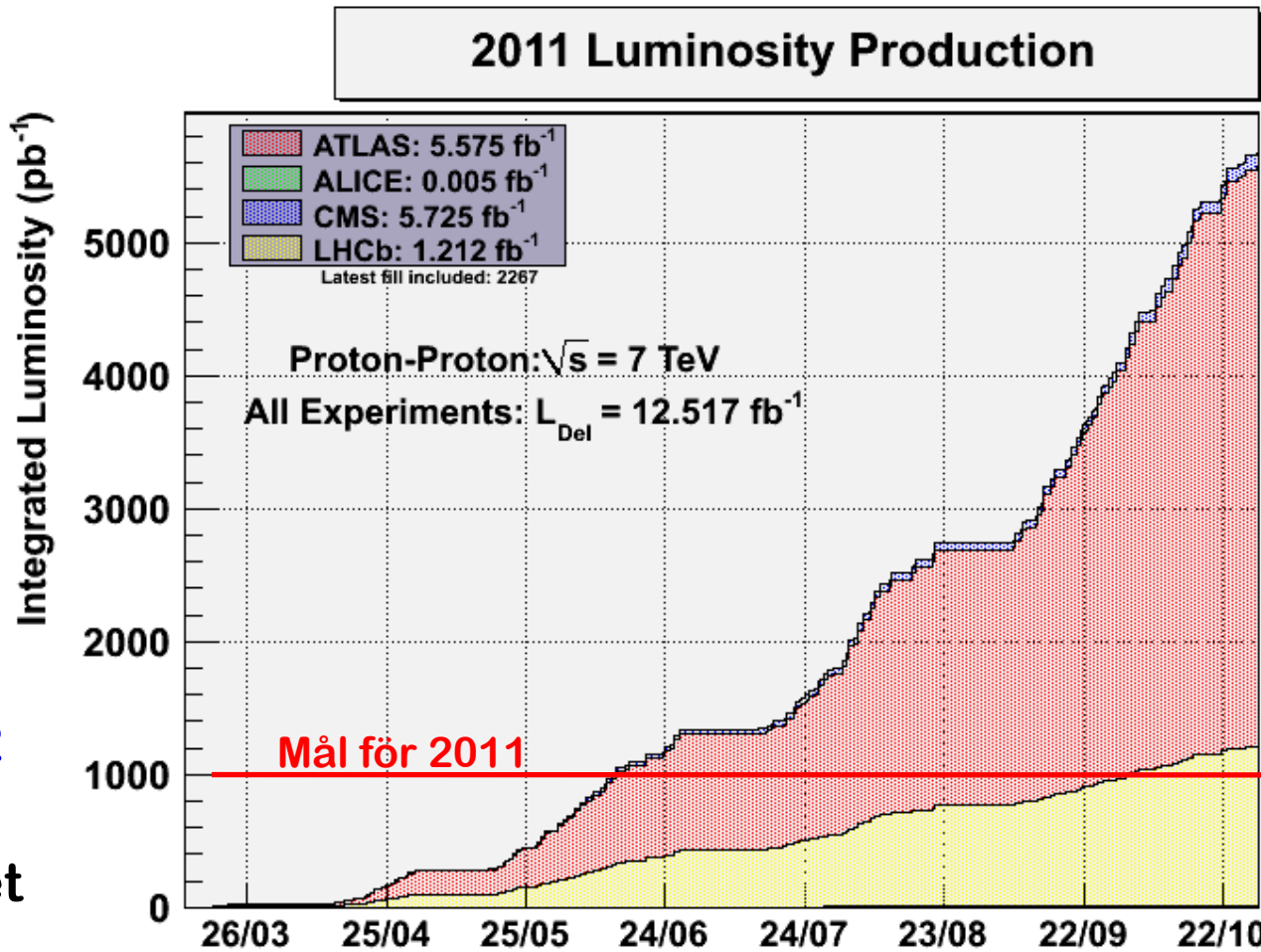
- **Marginaler nödvändiga mellan kollimatorer** för att inte hierarkin ska påverkas av felen
- 2010: väldigt väl tilltagna marginaler
- 2011 (R. Bruce, R. Assmann et al.): kvantitativ modell för att räkna ut nödvändiga marginaler baserat på data från tidigare körning av LHC
- 2012 (R. Bruce, R. Assmann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

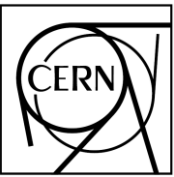


Optimering av strålstorleken i kollisionspunkterna

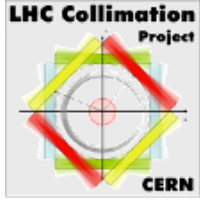



- Pga nya mindre marginaler tillåter vi nu en större stråle i tripletmagneterna, och därför en mindre stråle i kollisionspunkterna
 ⇒ faktor 2.25-3.5 högre luminositet 2011 jämfört med 2010.
 ⇒ ytterligare faktor faktor 1.7 högre 2012
- Årsmål för 2011 i integrerad luminositet uppnått redan i juni.
- En av många faktorer som gjort att experimenten redan

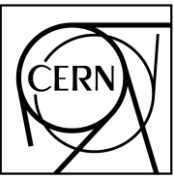




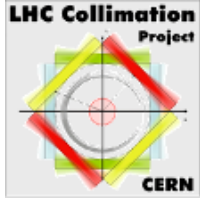
Outline



- **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 Pb^{82+} joner**

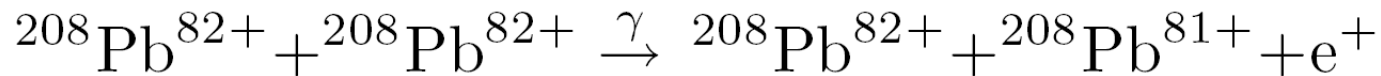


Elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande Pb⁸²⁺



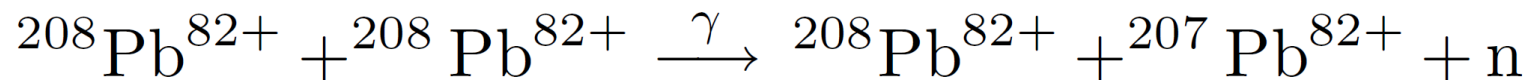
- Under körning med Pb⁸²⁺ (inga elektroner kvar!) i LHC sker s.k. ultra-perifera elektromagnetiska interaktioner mellan krockande strålar i kollisionspunkten:

- **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)

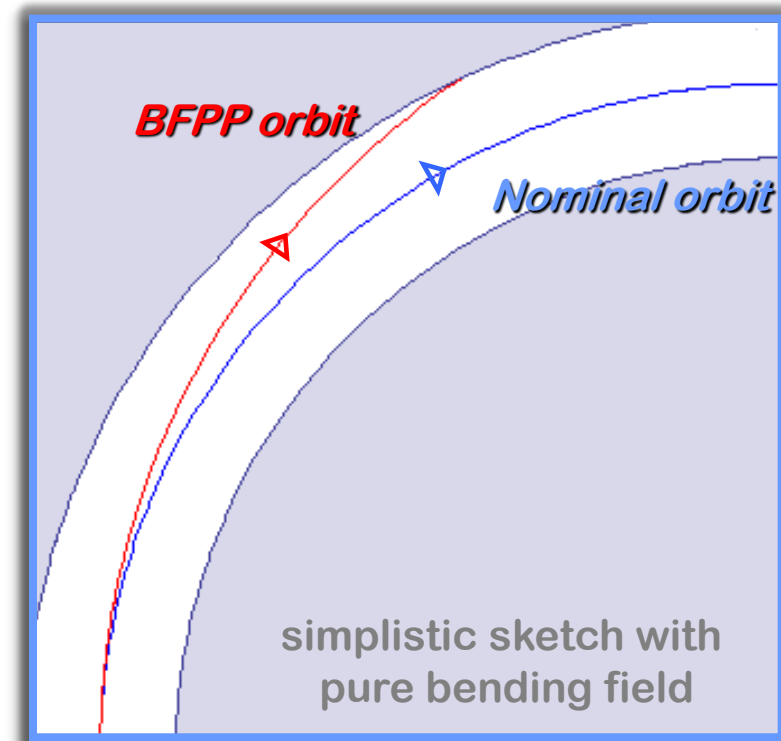


- **2-neutron Electromagnetic dissociation (EMD2, $\sigma= 29$ barn)**

Jämför: $\sigma_{\text{hadr}}=8$ barn

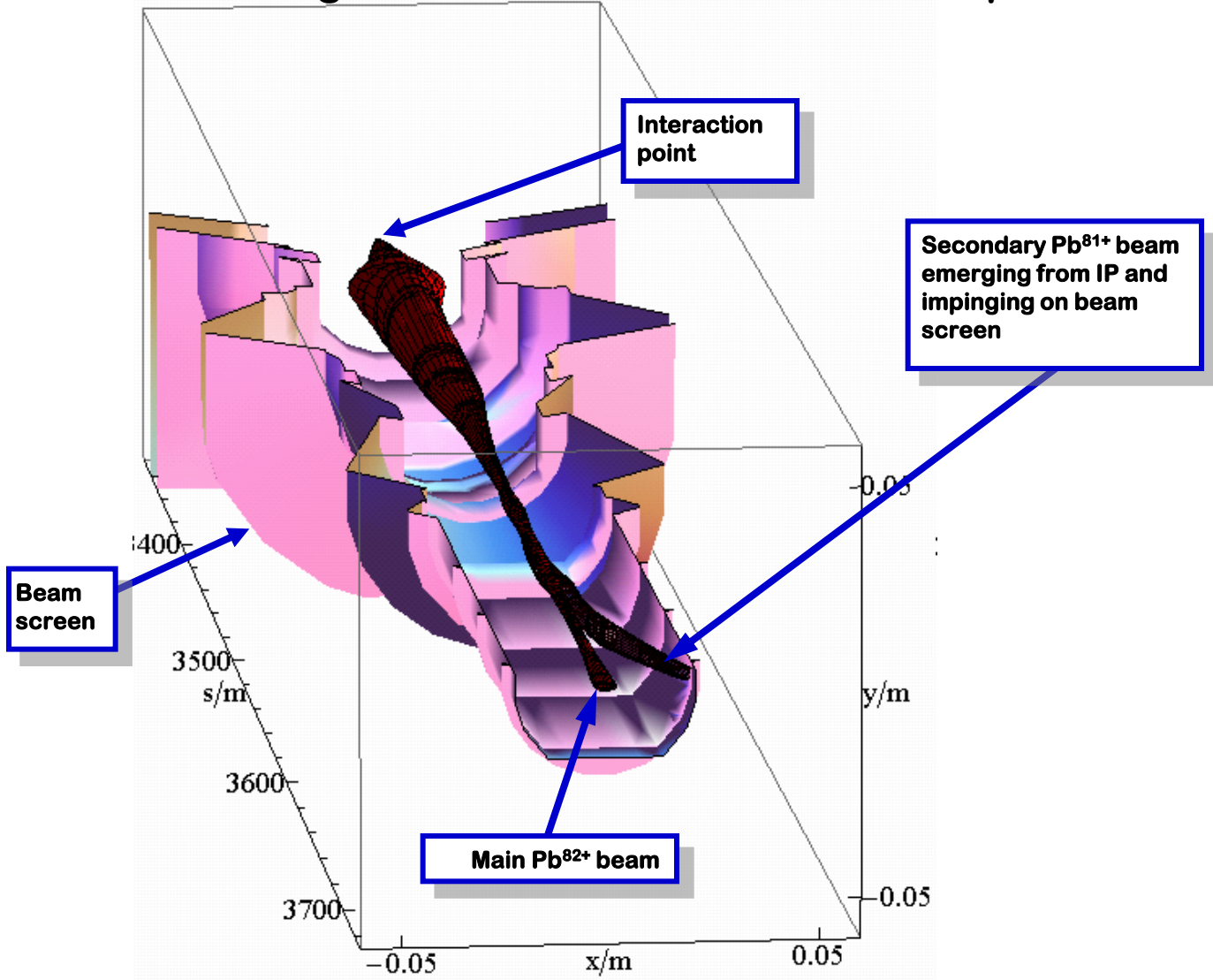
- Alla dessa processer skapar strålförluster!

- 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!**



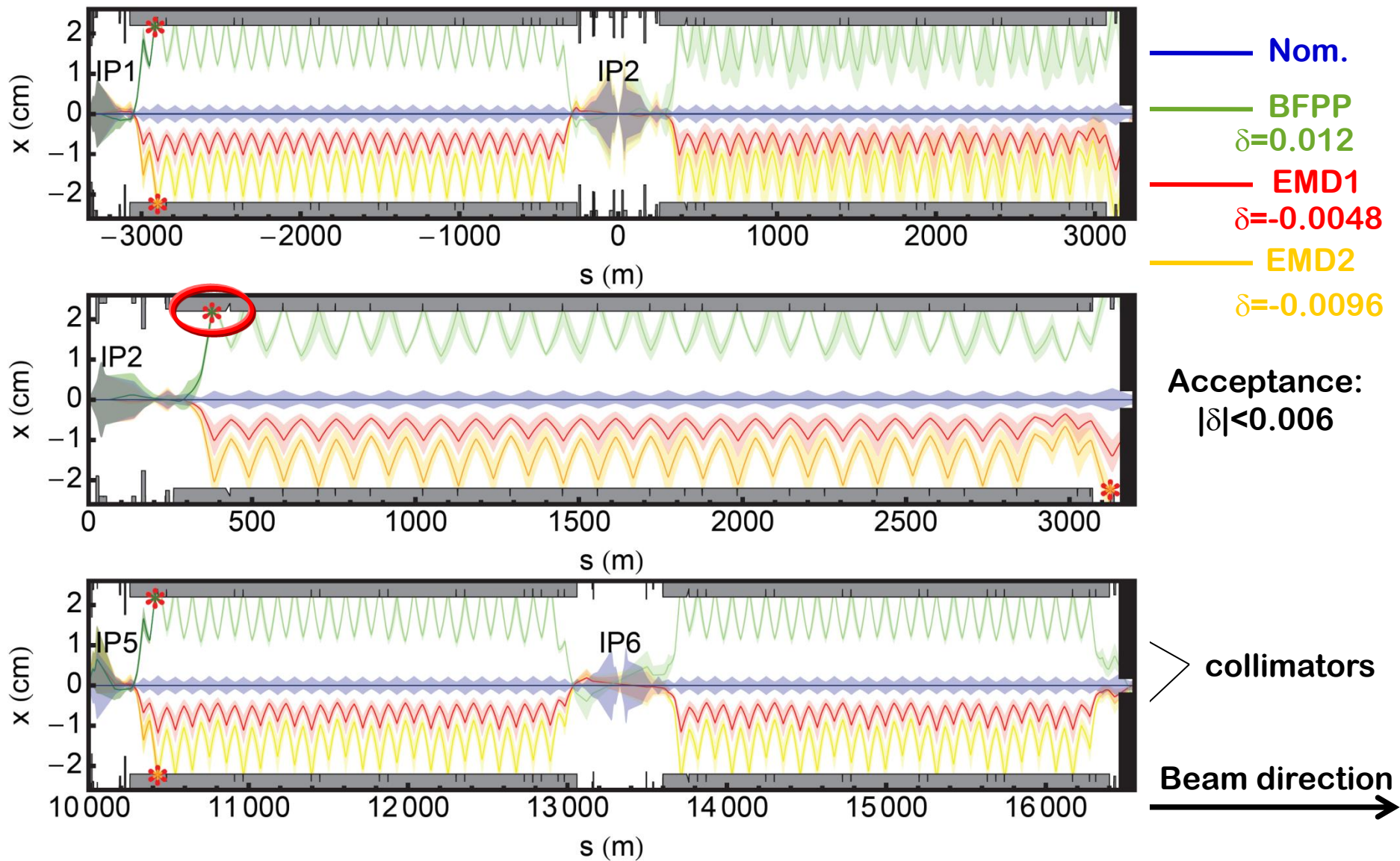
Strålbana för Pb⁸¹⁺

Exempel: Datorberäkning av BFPP-strålen ut ur ALICE experimentet





Elektromagnetiska interaktioner mellan kolliderande Pb⁸²⁺

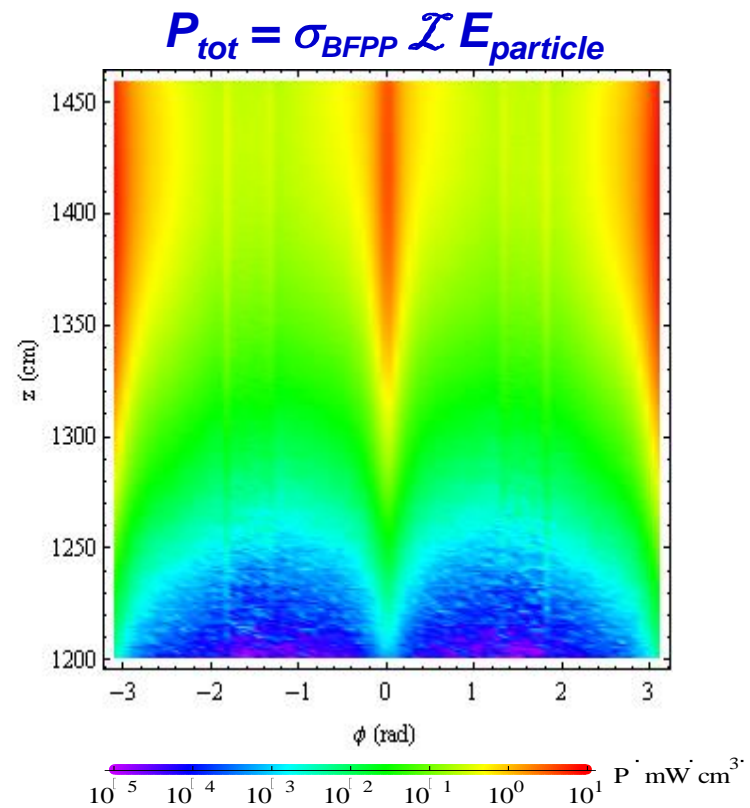
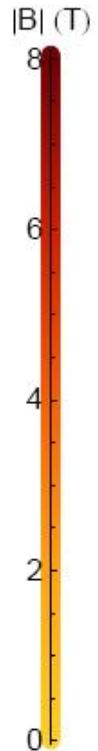
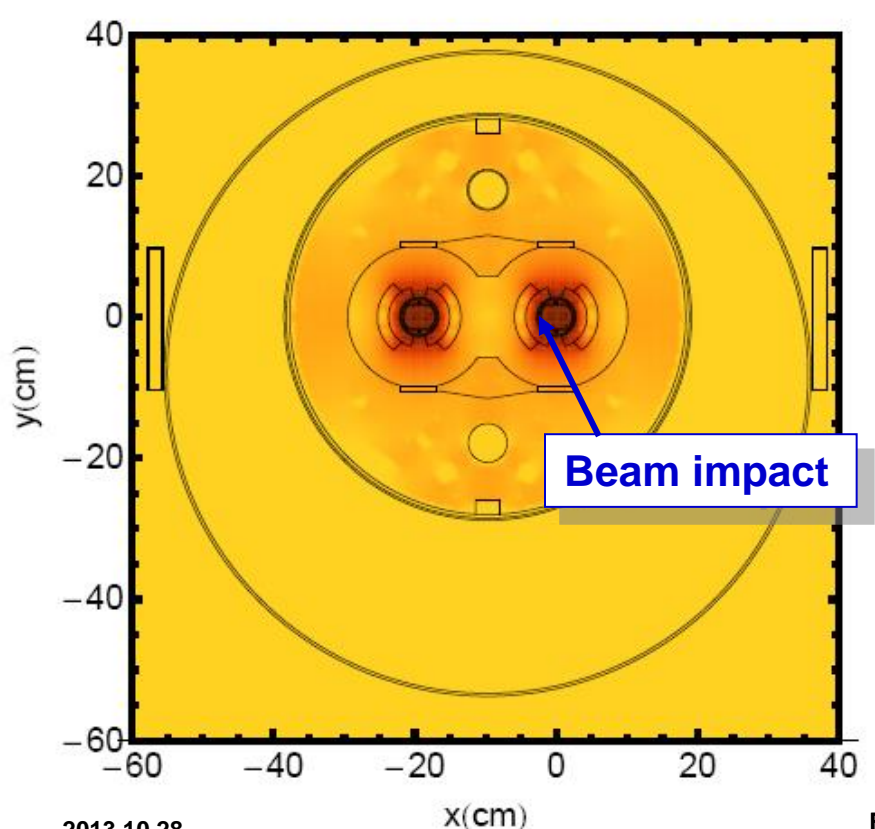


Simulering i 3 steg

- 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



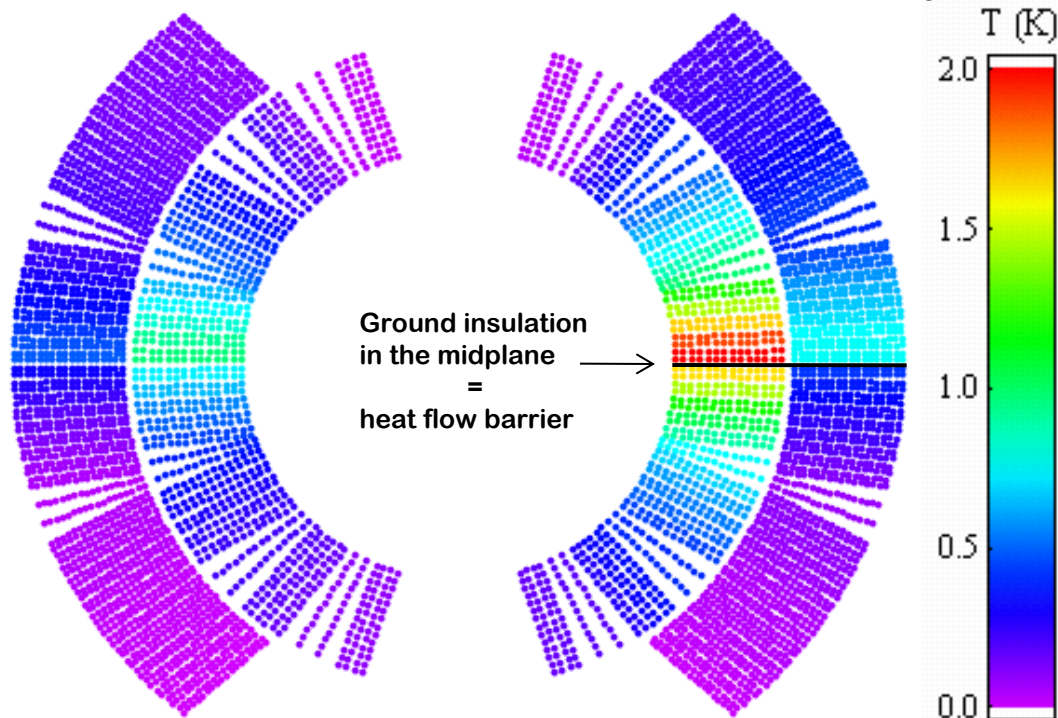
$$P_{tot} = \sigma_{BFPP} \mathcal{L} E_{particle}$$

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 Pb⁸²⁺ 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

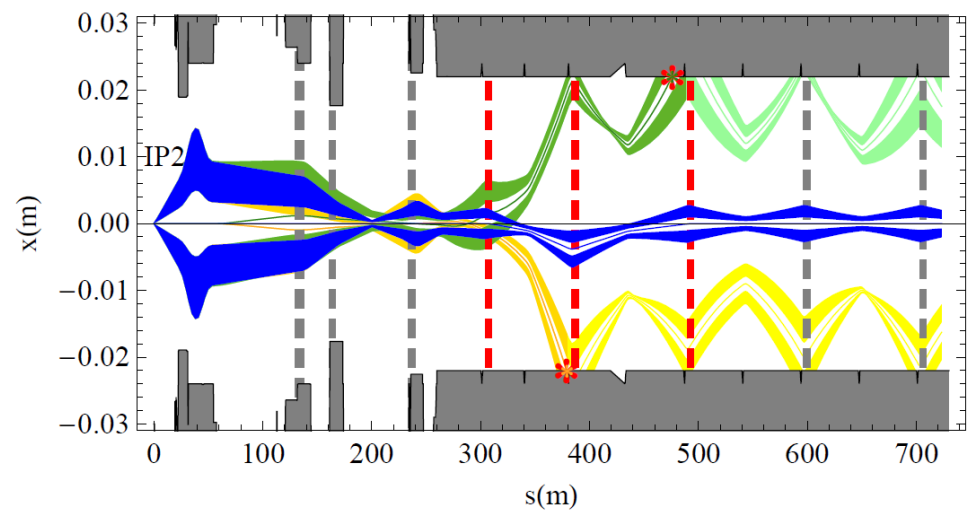
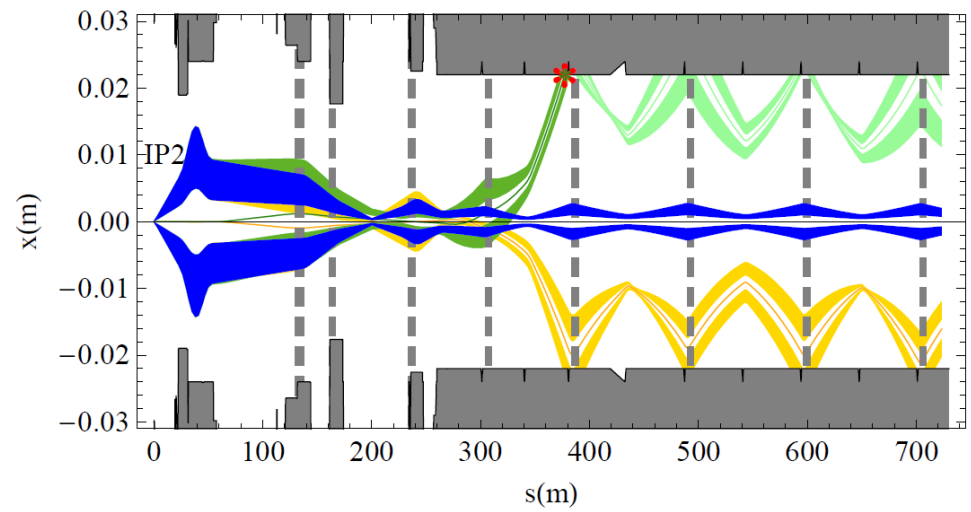
For nominal LHC ion beam conditions
(beam optics ver. 6.500)

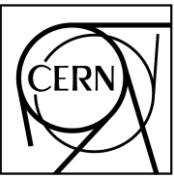


Lösningar?

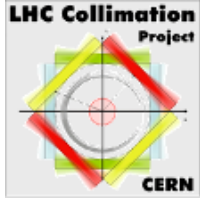


- Osäkerheten i hela simuleringskedjan gör att vi kan inte säkra på att det blir någon quench (men det kan bli värre också!)
- Förlusterna kan flyttas och spridas ut genom att ändra magnetfälten efter kollisionspunkten
- Extra kollimatorer som installeras framför magneterna
- Lägre energi (högre quench-gräns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