



# LUND UNIVERSITY

## 2016 invigs MAX IV-anläggningen i Lund

Werin, Sverker

2015

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Werin, S. (2015). 2016 invigs MAX IV-anläggningen i Lund. Fysikaktuellt.

*Total number of authors:*

1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

# 2016 invigs MAX IV-anläggningen i Lund

Möjligheten att i en accelerator perfekt kontrollera en stråle av elektroner och på så sätt styra egenskaperna på det ljus som elektronerna sänder ut har fått Sverige att investera stora resurser i en 528 m stor accelerator för att producera ljus.

För att undersöka egenskaperna hos material kan man använda olika tekniker. Eftersom de flesta atomer har skal med ett större antal elektroner som lätt kan växelverka med fotoner, ljus, är just elektromagnetisk strålning ett utmärkt verktyg. Nuvarande MAX-lab tar emot 1000 forskare från hela världen som behöver den intensiva ljuskällan och de olika instrument som finns tillgängliga vid de tre acceleratorerna MAX I, MAX II och MAX III. Behovet är stort och önskan att nå högre prestanda, mer intensivt ljus, mindre fokus och fler experimentstationer har startat utbyggnaden av ett helt nytt laboratorium: MAX IV.

## Ljus

Vi är omgivna av ljus: naturligt ljus från solen, artificiellt ljus från lampor och "tekniskt ljus" från bland annat radiosändare och röntgenapparater. 1947 vid General Electric i New York såg man dock för första gången ljus från en accelerator, det som skulle komma att kallas synkrotronljus. (Anekdoten säger att fysikerna som körde maskinen inte vågade titta själva, utan skickade in en av teknikerna som på så sätt blev den förste att "se ljuset").

De elektromagnetiska fälten runt en



elektron förändras när elektroner rör sig och accelererar. Denna förändring av fälten uppfattar vi som ljus. Ibland synligt ljus men lika ofta infrarött eller ultraviolett och röntgen. I en glödlampa där elektronerna rör sig på grund av värme utsänds svartkroppsstrålning och de våglängder (spektrum) vi får är beroende av temperaturen (ca 3000 K) vilket ger oss synligt och infrarött ljus. I mobilantenen rör sig elektronerna långsammare vilket ger längre våglängder, radiovågor, och i röntgenapparaten bromsar de in abrupt vilket ger kortare våglängder, röntgen.

För att förfinas egenskaperna på ljuset använder man olika metoder där en gemensam nämnare är att elektronerna separeras från atomerna och styrs för optimal ljusutsändning. Detta sker inte bara i en accelerator utan även i t ex laserbaserade källor där man formar ett plasma för att nå våglängder som inte är tillgängliga genom att bara använda elektroner bundna i atomer eller molekyler.

När elektronerna är fria består "ljuskällan" enbart av elektroner i en stråle eller puls. Genom att styra och kontrollera

MAX IV laboratoriet hösten 2014. De två ringarna och linjäracceleratorn är markerad.  
Foto: Perry Nordeng, 2014.

elektronerna kan man styra egenskaperna på ljuset.

## Relativistiska processer

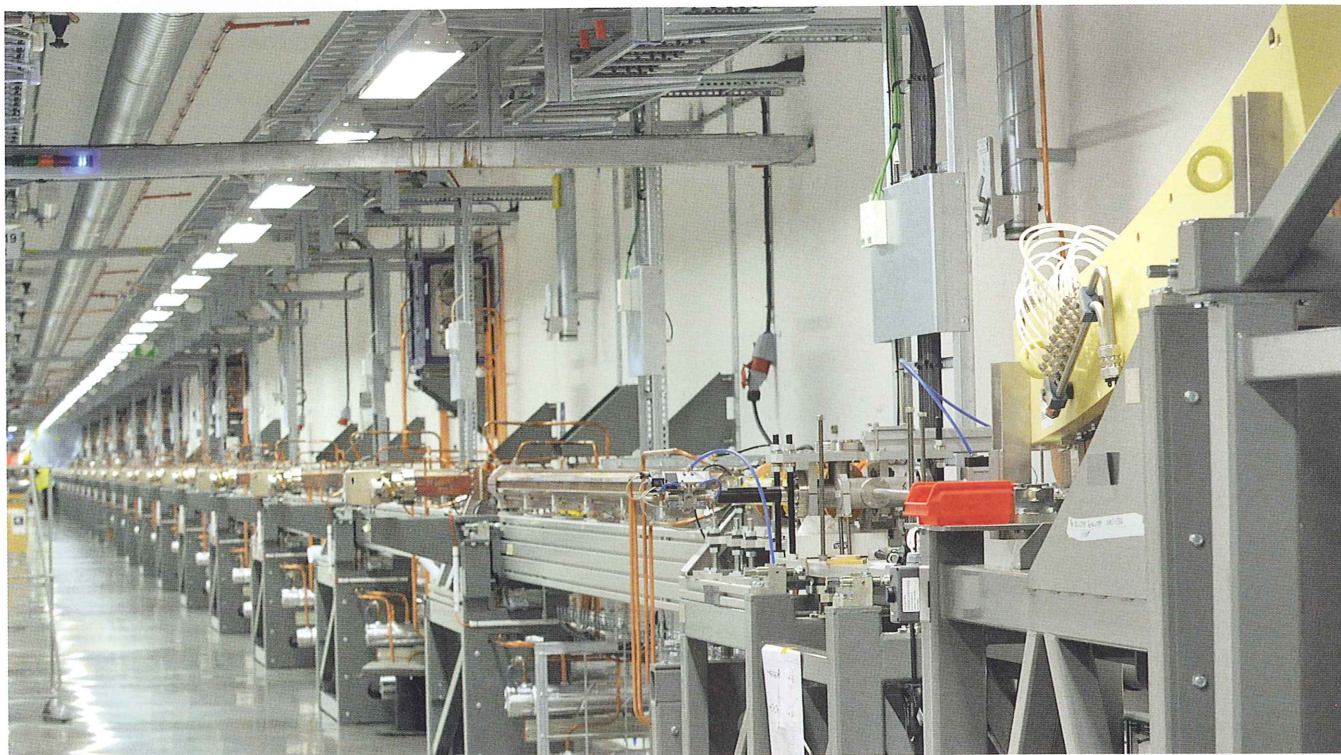
Om elektroner accelereras till höga energier, flera gånger dess vilomassa, så att de blir så kallat relativistiska förändras ljuset som vi uppfattar det i laboratoriet. Vi får ett "dopplerskift" av både våglängden (till mycket kortare) och utbredning (till en smal kon i framåtriktningen).

Genom att, som i MAX IV, accelerera en elektron till 6000 gånger sin vilomassa förkortas våglängden 6000 gånger. Dvs synligt ljus blir till röntgen ( $600 \text{ nm} \rightarrow 1 \text{ Å}$ ) och öppningsvinkeln minskas till  $1/6000$  radianer (0.01 grader)

## Acceleratorn

Acceleratorn består av några grundelement: kaviteter med elektriska fält för att





*Elektronkanonen (tv) och början av linjäracceleratorn i MAX IV. Foto: Annika Nyberg*

accelerera elektronerna, dipolmagneter med konstanta fält för att styra dem, kvadrupolmagneter som fungerar som magnetiska linser och speciella magneter för att styra utsändningen av ljus.

Elektronerna extraheras och accelereras i en injektor som oftast är en kombination av flera acceleratorer. I MAX IV används en elektronkanon och en linjäraccelerator. Kanonen skapar ett tåg av 5 ps långa pulser som sedan accelereras till full energi i den 250 m långa linjäracceleratorn. Elektronerna injiceras sedan i lagringsringen och vertikala magnetfält från magneter med två poler, dipoler, styr elektronerna runt ringen. Eftersom böjningsvinkeln beror av elektronenergin så uppträder det vi kallar dispersion, olika banor för olika energier.

Linser för elektronoptik är magnetiska och för att fokusera elektronstrålen används oftast magneter med fyra poler, kvadrupolmagneter. En egenhet med dessa är att när de fokuserar i ett plan så defokuserar de i det andra. En magnet som fokuserar horisontellt, defokuserar alltså vertikalt. Det betyder att man be-

höver använda flera linser för att fokusera i båda planen och att optiken inte blir symmetrisk. Magnetoptik lider av samma defekter som ljusoptik, t ex kromatiska effekter, där elektroner med olika energi får olika fokallängd. Precis som i ljusoptik kan man motverka dessa effekter med hjälp av linser med andra former: sextupol- och oktrupolmagneter med sex respektive åtta poler.

Elektronerna i en accelerator kan bara överleva en längre tid om det är mycket bra vakuum där de färdas. Därför består hela acceleratorn av ett vakuumrör som kontinuerligt pumpas för att hålla ett tryck motsvarande det i yttre rymden.

## Ljusutsändning

Ljuset skapas då elektroner passerar en magnet och "skakar" till. Detta sker på flera ställen runt maskinen men kan optimeras på olika sätt beroende på vad man vill förbättra. Vill man nå mer röntgenljus placerar man ett par starka magneter, en sk wiggler, där elektronens bana abrupt svänger fram och tillbaka. Vill man i stället öka intensiteten, briljansen, använder man många mindre svagare magneter i serie. Genom att ljuset från varje



*En kvadrupolmagnet längs linjäracceleratorn i MAX IV. Foto: Johan Persson.*

magnet kan interferera (samverka i fas) så kan intensiteten öka med flera storleksstorleksordningar. Dessa magneter kallas undulatorer.

## MAX-lab historia

1987 startade MAX I acceleratorn att producera ljus till de första entusiastiska användarna. MAX I var ett hemmabygge och första steget på en lång väg i jakten på bättre och bättre ljuskällor.

Utvecklingen har sedan gått snabbt. 1997 startade MAX II som är betydligt kraftfullare och optimerad för speciella magneter, undulatorer, för att kontrollera



ljusets egenskaper. Ytterligare tio år senare kom MAX III för att öka kapaciteten och utveckla metoder för det om skulle bli MAX IV. Samtidigt ersattes den gamla elektronkällan, en racetrackmikrotron som flyttat med från fysiska institutionen i Lund, med en modern linjäraccelerator, linac, och en radiofrekvens (RF) kanon, också detta förberedelser för de nya tekniker som var nödvändiga i utvecklingen av MAX IV.

Nu ser vi MAX IV som inte är bara en ring utan ett helt nytt laboratorium. Två ringar, modernast i världen, och en av Europas kraftfullaste linjäracceleratorer som lägger grunden även för framtida utveckling. Linjäracceleratorn förser både den mindre 1.5 GeV ringen, med 96 m omkrets, och den större 3 GeV ringen, med hela 528 m i omkrets, med elektroner. Ringarna är nästan tre ringar då den mindre samtidigt byggs i två exemplar där den andra sätts ihop till SOLARIS i Krakow, Polen.

MAX IV är en ljuskälla i vilken elektronerna accelereras och styrs för att optimera ljusutsändningen så att ljusets egenskaper passar undersökningarna av material i olika form.

### Vad gör MAX IV så speciell?

Elektronstrålen är själva ljuskällan (lampen) i systemet och det är viktigt att denna är så liten och väldefinierad som möjligt samtidigt som den är stabil och har hög intensitet. Emittansen berättar hur stor strålen är och hur parallellt elektronbanorna går. En låg emittans är nödvändigt för att kunna fokusera elektronstrålen och på så vis nå en liten ljuskälla som medför att ljuset kan fokuseras till ett mycket litet fokus. Elektronstrålen i MAX IV varierar runt maskinen men är ungefär 20  $\mu\text{m}$ .

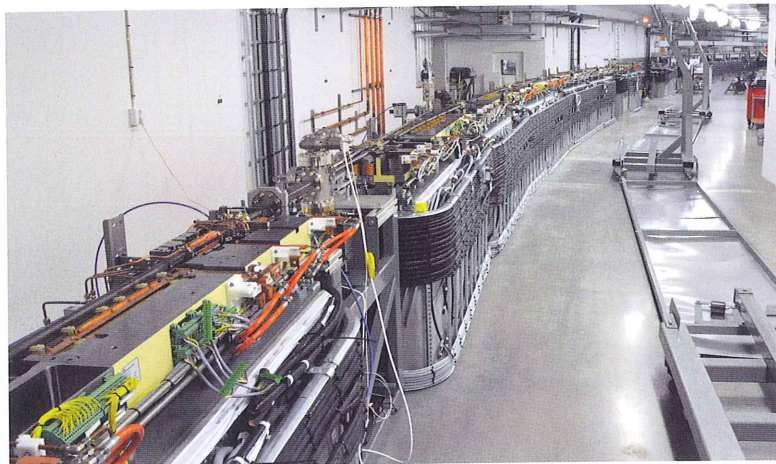
Flera processer sker inom elektronstrålen. Elektroner med olika energi oscillerar runt olika jämviktsbanor. Idealt skall elektroner med olika energi följa samma bana, men dispersionen i systemet gör att så inte är fallet. Problem uppstår då när en elektron sänder ut ljus (en foton). Den tappar då energi och börjar följa en ny bana. Är skillnaden mellan banorna stor

(stor dispersion) så blåser elektronstrålens storlek upp  $\rightarrow$  emittansen ökar. Det är just detta som MAX IV hanterar bättre än de flesta andra ljuskällor genom en optik där dispersionen minimeras. För att nå dit behöver man många, små och starka magneter. Eftersom en mindre emittans medför att strålens storlek minskar öppnar det möjligheter att minska magneternas storlek och mindre starkare magneter gör att man kan minska emittansen... i princip en positiv spiral, men samtidigt ökar elektrondensiteten i strålen och andra problem dyker upp vilka tagit år av designstudier för att lösa och hantera.

Det koncept som är utvecklat vid MAX IV sprider sig nu över världen. Från den nya ringen SIRIUS i Brasilien, via uppgraderingen av ESRF i Grenoble till förbättringen av Spring-8 i Japan, alla tar de upp designidéerna från MAX IV.

### Vart är vi på väg?

Även om synkrotronljus från en accelerator som MAX IV har nya och revolutionerande egenskaper ser vi att utvecklingen går vidare. Dels i riktning mot ringar med ännu mer förfinade egenskaper och en bättre integrering av experimentstationerna med accelerators egenskaper. Dels mot nya typer av ljuskällor som frielektronlasern (FEL). Drömmen är en röntgenlaser. Synkrotronljuset från en lagringsring är inte fullständigt koherent och det är svårt att nå pulser kortare än ett par pikosekunder. Med lasertechnik kan man göra detta men det är en utmaning att nå röntgenområdet speciellt med



*Några magnetsektioner i 3 GeV ringen i MAX IV. Överdelen av magneterna är avlyft och vakuumröret synligt. Foto: Annika Nyberg.*

intensiteter motsvarande en accelerator. En FEL kan däremot göra just detta vid röntgen våglängder och dessutom öka intensiteten med flera storleksordningar. Forskare börjar nu planera unika experiment som att göra 3D-filmer med holografiska metoder som följer enskilda atomer under tiden en kemisk reaktion sker.

En FEL är i grunden relativt enkel. En elektronstråle från en linjäraccelerator skickas in i en lång (50-100m) lång undulator. Om egenskaperna är de rätta kan man få ljuset att förstärka sig självt koherent med hjälp av elektronerna. Eftersom elektronerna är helt fria finns i princip ingen begränsning för de våglängder man kan arbeta vid. En hake är däremot att kraven på egenskaperna för elektronstrålen är mycket höga. Ett annat problem är att styra själva ljusutsändningen och inte låta lasern starta från brus, utan med väldefinierade egenskaper. Linjäracceleratorn i MAX IV är byggd för att kunna skapa dessa elektronstrålar och forskning på kontrollen av en FEL har pågått i många år. Det finns i dagsläget två röntgen-FEL i världen: LCLS i Stanford och SACLA i Japan. Ytterligare tre är under uppbyggnad: XFEL i Hamburg, SwissFEL i Schweiz och PALFEL i Sydkorea. MAX IV laboratoriet har påbörjat designstudier av en röntgen-FEL i Lund.

SVERKER WERIN  
PROFESSOR I ACCELERATORFYSIK  
LUNDS UNIVERSITET