

# Lagerringen ASTRID

Niels Hertel, ISA

Sidst i 1980'erne begyndte opbygningen af Danmarks største partikelaccelerator, en synkrotron og lagerring, der blev navngivet ASTRID. Til at varetage drift og udbygning af ringen blev der dannet et separat institut: Institut for Lagringsfaciliteter, der deler bygninger med Institut for Fysik og Astronomi. Ordet lagerring kommer af, at maskinen er ringformet, og er i stand til at lagre atomare partikler med meget høje hastigheder i lang tid.

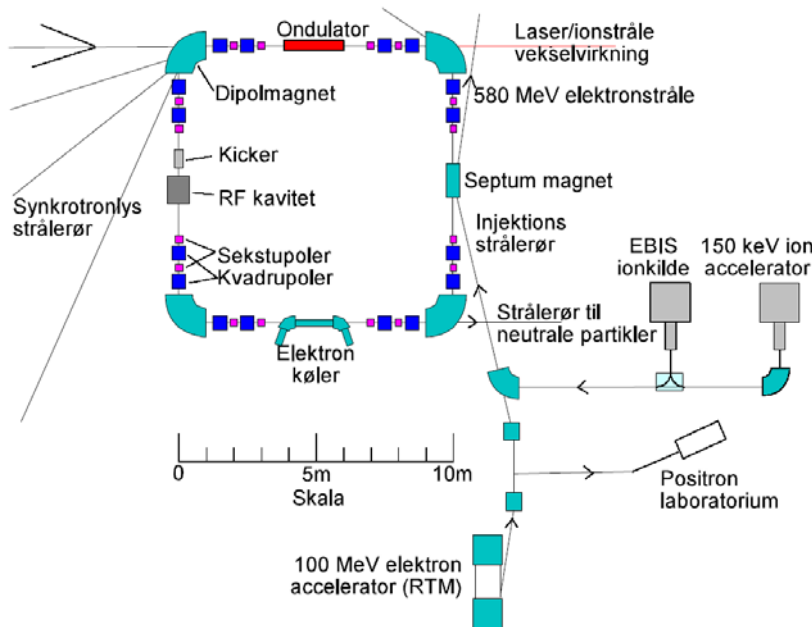
Vores ring er enestående, idet den kan lagre både ioner (elektrisk ladede atomer) og elektroner, der jo i sig selv bærer en elektrisk ladning. Elektrisk ladning er nødvendig, iden den gør at en sådan partikel kan accelereres i et elektrisk felt og afbøjes i magnetfelt. Her vil vi se nærmere på selve maskinen, samt på brugen af den som lagring for både elektroner og ioner.

## ASTRID som elektronlagring:

Formålet med i det hele taget at lagre elektroner er at udnytte den stråling de afgiver når de bliver påvirket af en kraft, som det f.eks. sker under afbøjning i et magnetfelt. Denne strålings specielle egenskaber gør den meget anvendelig til en lang række fysiske undersøgelser, og muliggør helt nye

typer undersøgelser. En af disse, røntgenmikroskopi, er nærmere omtalt nedenfor.

Meget forenklet er vores lagring et rør, der er formet som en firkant med runde hjørner. Selv om den rent faktisk ikke har ringfacon, kaldes en sådan maskine alligevel for en ring. Røret er pumpet så tomt som man kan, dvs. ned til et tryk på ca  $10^{-14}$  atmosfære. I ringens 'hjørner' er anbragt magneter, der indstilles sådan, at de akkurat afbøjer de lagrede partikler halvfems grader, så de kan fortsætte hen til den næste magnet.



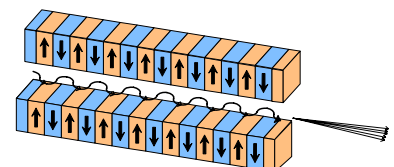
I magneterne udsættes partiklerne altså for kræfter, der ændrer deres retning. Nu er det sådan, at når man påvirker en elektrisk ladet partikel med en kraft (dvs ændrer dens impuls), mister den noget af sin energi, der så udsendes som elektromagnetisk stråling.

Bølgelængden af den udsendte stråling afhænger af kraftens størrelse og partiklens energi. Der kan altså i princippet være tale om alt fra meget store til meget små bølgelængder, dvs fra radio- og mikrobølger over infrarødt, synligt og ultraviolet lys til røntgenstråling.

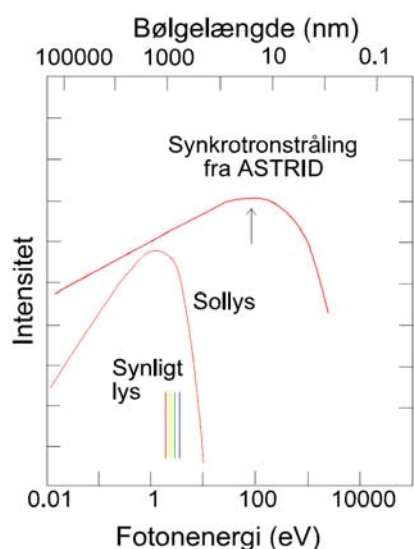
Udover afbøjningsmagneterne er der en række andre ting monteret på ringen: Kvadrupolmagneterne har 4 magnetpoler, og tjener til at fokusere den lagrede partikelstråle.

RF-kaviteten er et hulrum (nærmest en tønne, belagt indvendigt med kobber), i hvilket der oprettholdes et radiofrekvensfelt (heraf navnet RF), der skal accelerere strålen til den ønskede energi, samt kompensere for energitabet i hjørnerne.

Undulatoren er en række små magneter, der giver partikelstrålen en bølgebevægelse når den passerer. Dette giver speciel intens stråling, da partiklerne jo mærker en serie af kræfter skiftevis den ene og den anden vej.



Elektronerne accelereres til meget store energier og lagres derefter for at udnytte den elektromagnetiske stråling der udsendes ved afbøjningen i magneterne. Denne stråling kaldes synkrotronstråling.



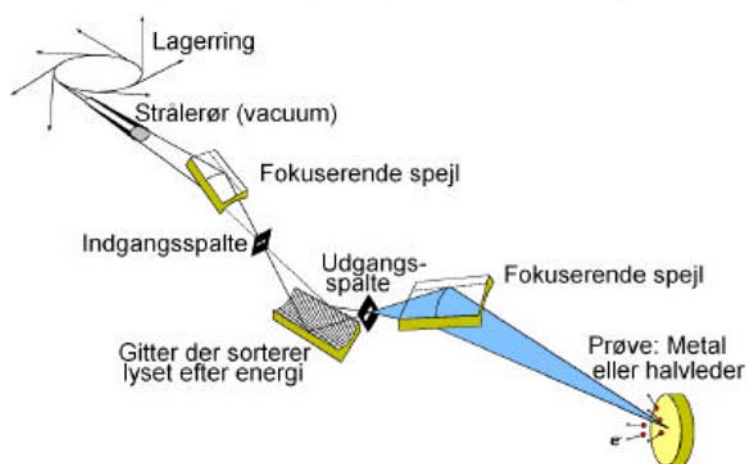
Strålingen er ikke bare interessant på grund af det meget brede spektrum af bølgelængder, men også på grund af dens intensitet og kollimering (rumlige udbredelsesretning). Strålingens intensitet er tusinder gange stærkere end den der fås fra røntgenrør, og selv i det synlige område er den stærkere end solen! Ydermere er strålingskilden, altså elektronstrålen i ringen, så lille at der næsten er tale om en punktkilde, hvilket er en stor fordel set fra et anvendessynspunkt. Det gør nemlig, at man kan fokusere lyset ned til en meget lille plet, eller lave et større, parallelt strålebundt, alt efter hvad man har brug for. En anden vigtig egenskab ved strålingen er, at den er polariseret, dvs. den elektriske feltvektor ligger i en retning, nemlig i ringens plan (vandret i vores tilfælde).

Elektronerne i ringen kommer fra en foraccelerator, der giver elektroner med en energi på 100 MeV (Millioner elektronvolt, svarende til at de har gennemløbet et spændingsfald på 100

millioner volt). I ringen accelereres de til en energi på ca. 580 MeV, og det er ved denne energi, at de lagres i mange timer, somme tider en hel dag.

Allerede ved injektionsenergien (100 MeV), har elektronerne stort set opnået lyshastighed (ca 300000 km/s), der jo er grænsen for, hvor hurtigt ting kan bevæge sig. Når de accelereres yderligere i ringen, øges hastigheden ikke - al energitilvæksten går til at øge elektronernes vægt. Ved fuld energi er de over 1000 gange så tunge som da de lå stille! Når de bevæger sig så hurtigt, sker strålingsudsendelsen næsten kun i fremadretningen, dvs. at strålingen fra en elektron på vej rundt i et hjørne, minder om lyset fra forlygterne på en bil der kører rundt i et sving.

De eksperimentelle opstillinger, der anvender synkrotronstråling er forbundet til selve ringen med et udpumpet rør, i hvilket strålingen kan bevæge sig uhindret i. Vacuum er nødvendigt, for mens synligt lys trænger godt igennem luft, absorberes såvel UV-lys som røntgenstråling. Disse strålerør er alle monteret så de er tangenter til elektronernes bevægelse i hjørnet. Derved passerer strålingen gennem røret, og transporteres på den måde ned til det eksperiment der skal bruge den. Undervejs til den eksperimentelle opstilling kan der være forskellig optik, blænder m.m., der tjener til at tilpasse strålingens egenskaber til det eksperiment der skal finde sted.



Et vigtigt instrument til denne tilpasning er en monokromator. Ordet kommer fra de græske ord mono : enkelt, og kroma : farve, og betegner et instrument, der er i stand til at udvælge en enkelt farve (et snævert bølgelængdeinterval) fra det brede spektrum der kommer fra ringen. Selv om kun en lille del af den stråling der kommer fra ringen er synligt lys, bruger man altså alligevel ordet farve.

Monokromatiseringen sker ved hjælp af et såkaldt gitter, der er en flade, i hvilken der er lavet et stort antal

parallele ridser eller streger. Interferenseffekter gør, at man for en givet indfaldsvinkel kun får et smalt bølgelængde-bånd (een farve) 'reflekteret'. Det er ofte nødvendigt at monokromatisere lyset, idet man tit ønsker at undersøge processer der er afhængige af energien (farven) af den indfaldende stråling. Vi har flere monokromatorer monteret på vores ring. De er temmelig store: Der er op til 25

meter fra strålingen bliver udsendt til en lille del af den rammer den prøve der skal undersøges. Mange af de undersøgelser der foregår med strålingen handler om overflader. Et stofs overflade er jo dets kontakt med omverdenen, og overfladens struktur og kemiske forhold er derfor af meget stor betydning for en lang række processer. Eksempler er korrosion (rust, ir), elektriske kontakt-egenskaber og katalyse Andre undersøgelser er mere fundamentale i deres natur: De kan for eksempel dreje sig om at fastlægge detaljer i et atoms elektronstruktur. Ellers udføres de fundamentale eksperimenter ofte når vi lagrer ioner i ringen, hvilket vi gør ca. halvdelen af tiden. Elektron- og iondrift skifter med ca 10 ugers intervaller.

Udover ovennævnte type målinger bruger vi ringen som lyskilde for vores røntgenmikroskop, der er nærmere omtalt nedenfor.

## Røntgenmikroskopi:

### Røntgenmikroskopets egenskaber:

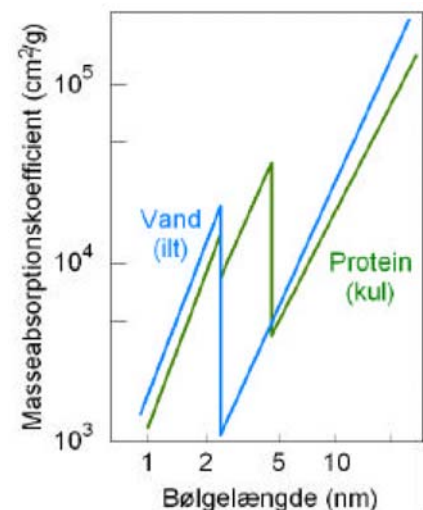
I 1600 tallet opfandt lysmikroskopet, der hurtigt blev et centralt værktøj indenfor naturvidenskab. I midten af dette århundrede kom elektronmikroskopet til, og med dette kunne en lang række strukturer observeres i hidtil ukendt detalje - næsten ned på atomar skala.

I løbet af de sidste 10-15 år er røntgenmikroskopet blevet udviklet, og det har atter åbnet for nye opdagelser. Det enestående ved røntgenmikroskopet er, at man kan f.eks. kan iagttage levende celler uden forudgående behandling. Dette er muligt fordi man kan udnytte absorptionen af røntgenstrålingen til at give naturlig kontrast, dvs uden først at skulle 'farve' de strukturer man ønsker at iagttage.

Lad os først se på den måske vigtigste egenskab ved røntgenmikroskopet:

Når man skal tage et billede med et lys- eller elektronmikroskop, må man ofte først udsætte sit prøve for en noget hårdhændet behandling, som f.eks. frysetørring, indstøbning i plastic, farvning m.m. Dette kan give nogle fantastisk gode billeder, men hvad er det man afbilder? Er netop de strukturer man vil undersøge upåvirkede af præparationen? Mange biologiske strukturer er meget robuste og holder fint til det, men andre ødelægges af blot en udtørring.

Her er det, at røntgenmikroskopet kommer ind i billedet. Se f.eks. på grafen til højre, der viser absorptionen af røntgenstråling som funktion af strålingens bølgelængde for de to grundstoffer kul og ilt. Hvis man ser på lange bølgelængder (højre side af kurven) absorberer ilt og kul nogenlunde lige meget. Mindsker vi nu bølgelængden (går mod venstre på kurven) falder absorptionen jævnt, men pludselig (ved en bølgelængde på 4.4 nm) stiger absorptionen i kul brat, svarende til, at energien nu er tilstrækkelig til at få en elektron i den inderste skal til at hoppe til en anden tilstand. Efter yderligere at have mindsket bølgelængden til 2.3 nm sker der samme for ilt, og herefter følges de to kurver atter ad.



Det man skal lægge mærke til her er, at med bølgelængder i intervallet 2.3 til 4.4 nm absorberer kul meget, mens ilt absorberer meget mindre. Dvs. at ilt er 'gennemsigtigt' i forhold til kul. Da 'byggestenene' i en levende celle overvejende består af f.eks. proteiner, der indeholder meget kul, bliver de mindre gennemtrængelige for strålingen end 'fyldstoffet' i cellen, der hovedsagelig er vand, hvis absorption er domineret af absorption i ilt. Det er altså ikke nødvendigt at udtørre eller farve cellen for at se hvad den indeholder. Cellen må gerne være i vand, og kan sågar være levende mens den bliver undersøgt.

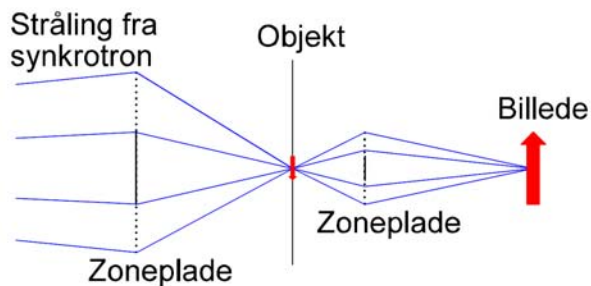
Blandt de 'sarte' strukturer der er blevet undersøgt med et røntgenmikroskop er kromosomer, sædceller, alger og spindelvæv! Mere herom senere.

## Røntgenmikroskopets teknologi:

Et røntgenmikroskop er meget traditionelt opbygget, i princip ganske som et almindeligt lysmikroskop: En linse fokuserer strålingen ned på prøven i en plet på ca 20 mikrometer (1/50 mm), og en billeddannende linse bag prøven danner et billede af den belyste plet på en film eller direkte på et digitalt kamera (CCD).

Her ser du en principskitse af røntgenmikroskopet:

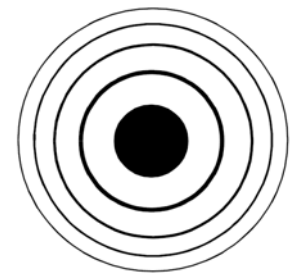
Linserne der benyttes er et kapitel for sig: Den type der benyttes til synligt lys bygger på brydning i glas. Dette princip kan ikke anvendes til røntgenstråling af to grunde: dels er brydningsforholdet for



røntgenstråling i de fleste materialer meget tæt på 1.0, og man ville altså ikke kunne opnå nogen fokusering af betydning. Dels absorberes røntgenstrålingen alt for meget, så linsen kunne langt fra opnå den nødvendige tykkelse.

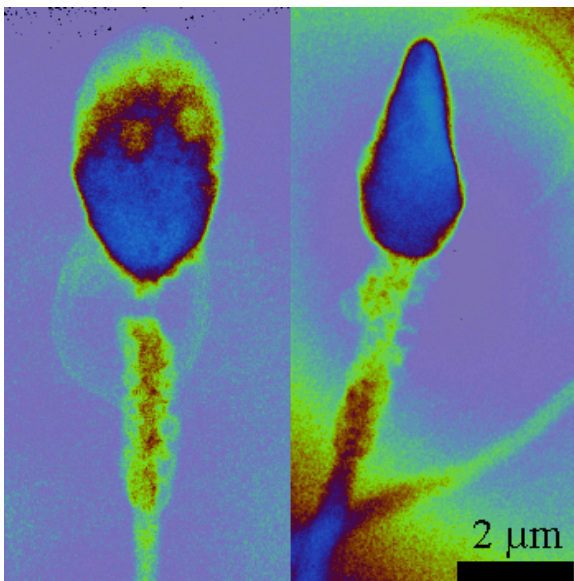
I stedet benyttes det der kaldes diffraktionsoptik, dvs. et stort antal meget tætliggende linier (her er det dog tætliggende koncentriske ringe), der via interferenseffekter kan afbøje strålingen således at man får en fokuserende effekt. En sådan struktur

er altså en slags cirkulært diffraktionsgitter. Her er vist en principskitse af en sådan 'røntgenlinse', også kaldet en zoneplade. Fokuseringen opnås ved, at stråling der rammer pladen langt fra centrum, hvor cirklerne ligger tæt, afbøjes mere ind mod midten end stråling der rammer nærmere pladens centrum. I praksis er ringene lavet af f.eks. germanium, og er ned til 30 nm (nm: en nanometer = en milliontedel millimeter) brede og nogle hundrede nm høje. De ligger på et 100 - 200 nanometer tykt siliciumfolie, der kan være op til en cm i diameter. Der findes linser med op til 40000 'zoner'.



De fleste undersøgelser på mikroskopet foregår i nært samarbejde med kolleger fra andre institutter på universitetet, som f.eks. biologi, medicin og zoologi.

Med Århus-mikroskopet er der blevet taget billeder af så forskellige ting som blå-grønne alger, spindelvæv, sædceller (billedet til venstre) og bakterier der udfælder jern i danske vandværker og moser (myremalm).



Alt sammen strukturer der ændres af udtørring og præparation til et elektronmikroskop. Der er meget at lære om disse emner, f.eks. har spindelvæv en helt utrolig styrke og elasticitet, og det er af stor interesse kunstigt at kunne producere noget lignende.

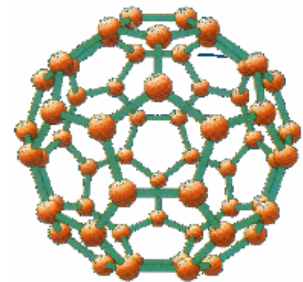
Med dette enestående instrument har vi på mange områder fået pudset brillerne, og der venter mange spændende opdagelser fremover.

## ASTRID som ionlagring.

Som I sikkert ved, er en ion betegnelsen for et atom, der ikke har det 'normale' antal elektroner. Der er altså enten under- eller overskud af elektroner, og ionen er følgelig enten positivt eller negativt ladet, og kan derfor accelereres af et elektrisk felt, og styres af et magnetfelt præcis som elektronerne der blev nævnt i forrige afsnit.

Den største forskel mellem lagring af elektroner og ioner i ringen er, at ionerne er utroligt meget tungere end elektroner. Husk på, at en selv den simpleste ion,  $H^+$ , dvs. en proton, er næsten 2000 gange tungere end en elektron. Med en fast afbøjningsradius i magneterne i ringens 'hjørner' bestemmer magnetfeltet hvilken impuls partiklerne kan have. Da ioner er så tunge, kan de altså kun lagres ved hastigheder der er meget lavere end elektronernes, og følgelig også med meget lavere energier. Dette betyder, at de ikke som elektronerne er relativistiske, og altså har hastigheder, der varierer med deres masse og energi. Typiske hastigheder er i størrelsesordenen 100 km/s. Dette besværliggør i nogen grad accelerationen i ringen, da RF-frekvensen ikke længere er konstant som funktion af energien.

I ASTRID har vi gennem tiden lagret vidt forskellige ioner. Den letteste er en positiv brintion ( $H^+$ , altså en proton) der jo har en masse på 1 amu (atomar masseenhed). En af de tungeste er et kulstofcluster ( $C_{60}^+$ ), der har en struktur der minder om en fodbold, bestående af 60 kulstofatomer (se figuren til højre). Da disse jo hver især vejer 12 amu, vejer strukturen altså 720 amu. Energierne varierer også meget: Fra ca. 10 keV for de tungeste ioner til over 100 MeV for en proton.



Ionerne produceres i en lille foraccelerator, der kan bringe ionerne op på en energi på maksimalt 150 keV. Herfra injiceres de i ringen, hvor de eventuelt kan accelereres yderligere.

Formålet med at accelerere og lagre ioner er udelukkende at studere ionerne selv gennem længere tid, og deres vekselvirkning med f.eks. elektronstråler eller laserlys. Af ting der kan studeres kan nævnes sandsynligheder for at elektroner bringes fra en bestemt tilstand til en anden i ionen, samt studier af elektronindfangning i positive ioner.



For eksempel blev der for nogle år siden lavet målinger af sandsynligheden for bestemte elektronovergange i iltioner. Her blev det for første gang fastslået, at det grønne lys der kan observeres i atmosfærens yderste lag (mere end 100 km oppe) faktisk skyldes en overgang i iltatomerne.

Teoretiske beregninger havde indtil da tilskrevet denne proces meget lav sandsynlighed, men målingerne ved ASTRID sagde altså noget andet

Et eksempel på målinger af ioners levetid er studiet af en negativ heliumion,  $He^-$ . Som man kan forestille sig, hænger den ekstra elektron ikke ret godt fast, da de to elektroner et heliumatom jo normalt er udstyret med danner en lukket skal. Faktisk har vi i ASTRID observeret, at denne tilstand har en levetid på ca 275 mikrosekunder, en måling der ikke så let lader sig gøre på andre måder!

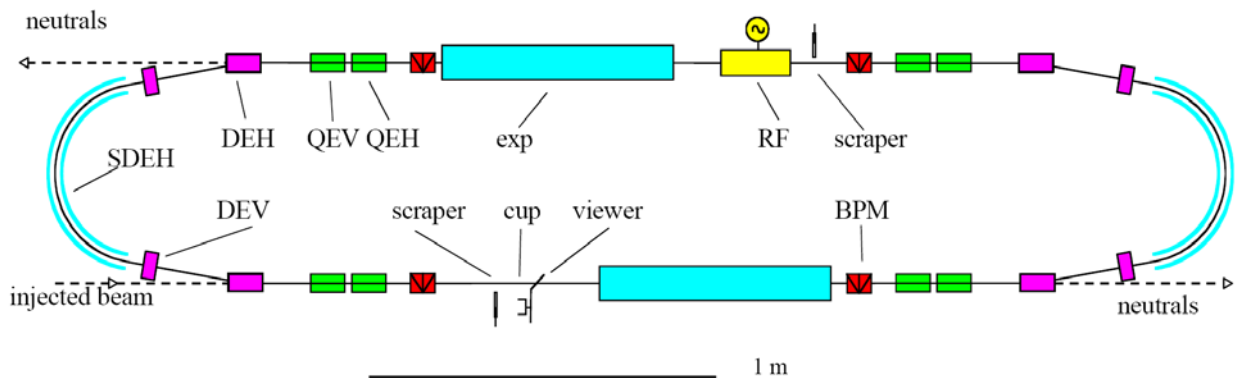
I de perioder ASTRID benyttes til ionlagring holdes pause ved de eksperimenter der benytter synkrotronstråling. Ionerne er så tunge, at der ikke frembringes nævneværdig synkrotronstråling.

# Lagringen ELISA

En del af ionprogrammet ved ASTRID laves med stråler der ikke er accelererede, hvor energien ikke er kritisk og hvor eksperimenterne alene er afhængige af en lang levetid samt mulighed for detektion af neutraliserede ioner/fragmenter samt muligvis at påvirke ionerne med lasere etc. Dette gælder for eksempel de ovenfor omtalte levetids eksperimenter samt eksperimenterne med  $C_{60}$ , der er blevet videreført på ELISA med øget præcision.

Disse tanker ledte til ASTRID's lillesøster, ELISA (ELectrostatic Ion Storage ring, Aarhus. ELISA er enestående i verden, idet den er den første ion lagring i verden, der udelukkende benytter elektrostatiske elementer til styring og fokusering af strålen.

En skitse af ELISA er vist herunder.



*Principskitse af ELISA. SDEH: 160 graders afbøjning. DEH: 10 graders horisontal afbøjning. DEV: Vertikal styring. QEV, QEH: Vertikal og horisontal kvadrupol. BPM: Pick-up til positionsmåling.*

Elektrostatiske elementer har flere fordele i forhold til magnetiske: Elementerne og de tilhørende forsyninger er betydelig billigere både i anskaffelse og drift, og elektriske kræfter afhænger kun af ionernes ladning, hvilket medfører at i princippet kan ioner med enhver masse lagres. Den største begrænsning ved en elektrostatisk lagring er, at det ikke er muligt at lagre højenergetiske ioner på grund af de høje afbøjningsspændinger dette ville kræve. I ELISA er grænsen ca 25 keV.