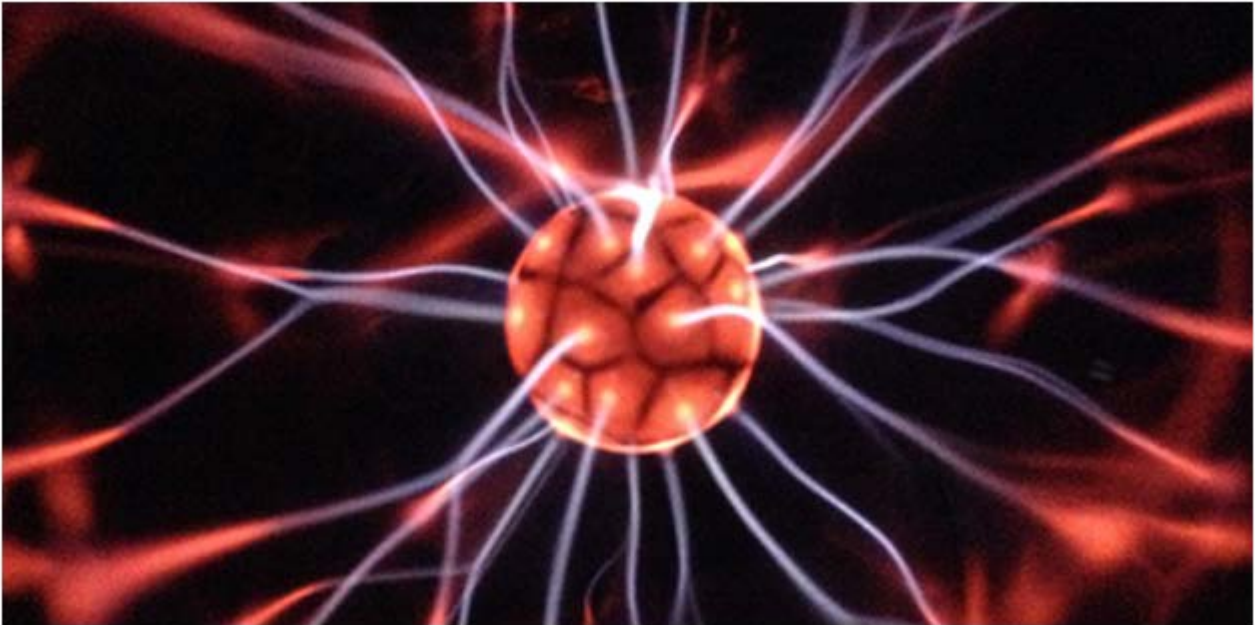
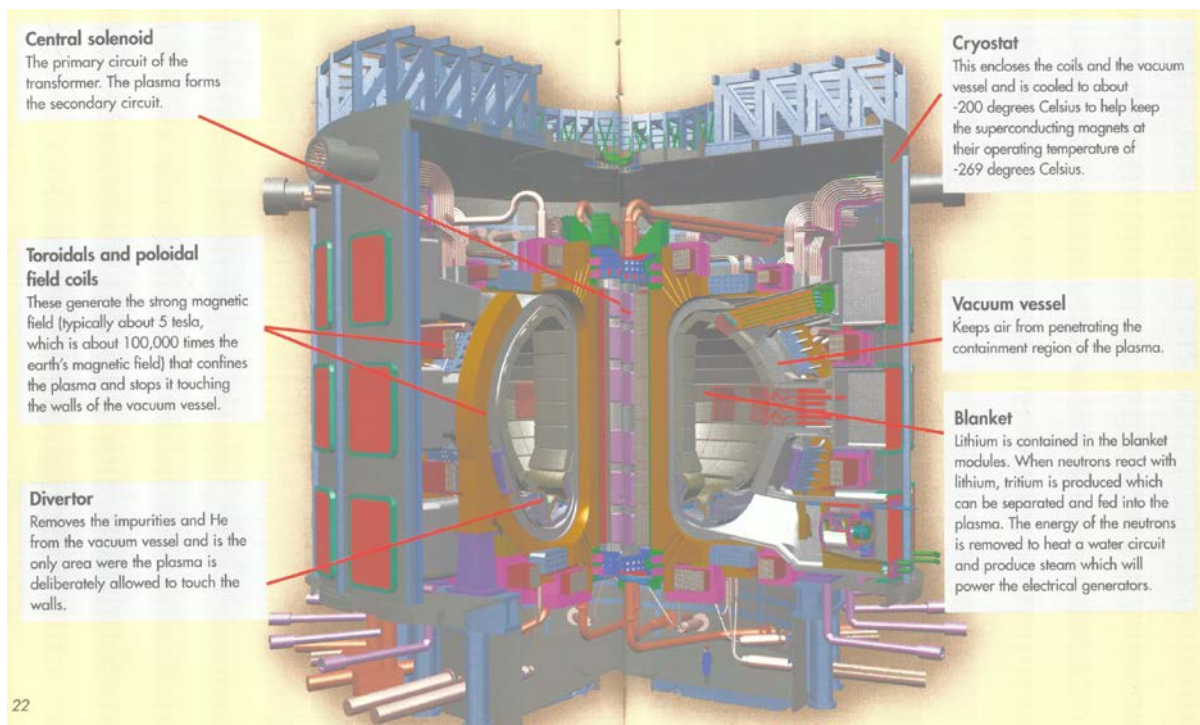


PLASMAFYSIK med ELEKTRONSTRÅLER

Prøv at efterligne plasmafænomener. Lær om partikelbevægelse i plasma. Bestem forholdet e/m



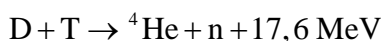
Figur 1. Udladninger i plasmakugle, dvs. en udpumpet glaskolbe med en højspænding på elektroden i centret - den lysende kugle midt i billedet. Glaskolben er uden for billedfeltet. Spektret kan måles med et spektrofotometer uden på glaskolben. Udladningerne søger af sig selv mod lyslederkablet på spektrofotometret, når dette berører glaskolben.



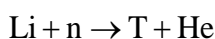
Figur 2. Tokamak-reaktor (ITER). Bemærk den lille person nederst i billedet, inde i reaktoren, under de brune rør. Fra "Fusion Research. An Energy Option for Europe's Future", Euratom 2007. Se også: <https://www.iter.org/album/Media/7%20-%20Technical>.

ITER og Fusion

Den internationale eksperimentelle Tokamak-reaktor (ITER) er under konstruktion i Saint-Paul-lez-Durance i Frankrig. Målet er, at den skal kunne danne et plasma med en energi-indeslutningstid på cirka 6 sekunder. Plasmaet dannes af tung og supertung brint. Atomernes elektroner er slået fuldstændigt fri så elektroner og kerner bevæger sig som i en suppe mellem hinanden – et plasma. Energi dannes ved kernereaktioner, som frigiver 3,52 MeV pr nukleon. Det svarer til 338 millioner MJ/kg. Til sammenligning har benzin en brændværdi på 47,2 MJ/kg. Kernereaktionen udvikler helium



D'et er en deuteriumkerne (tung brint) mens T'et er en tritiumkerne (supertung brint). Tritium må fremstilles kunstigt, da det er ustabil - halveringstid 12,33 år. Neutronerne kan bruges til ny tritium ved at lade dem ramme litium i reaktorvæggene



Inde i reaktoren søges plasmaet holdt fast af magnetfelter, så det ikke rører væggene. Det ville nemlig betyde, at temperaturen faldt og reaktionen gik i stå. I praksis vil de ladede partikler dog drive mod væggene. Dette forhindres ved hjælp af inhomogene felter, som "spejler" partiklerne tilbage mod midten. Vi skal illustrere dette ved at benytte e/m -røret.

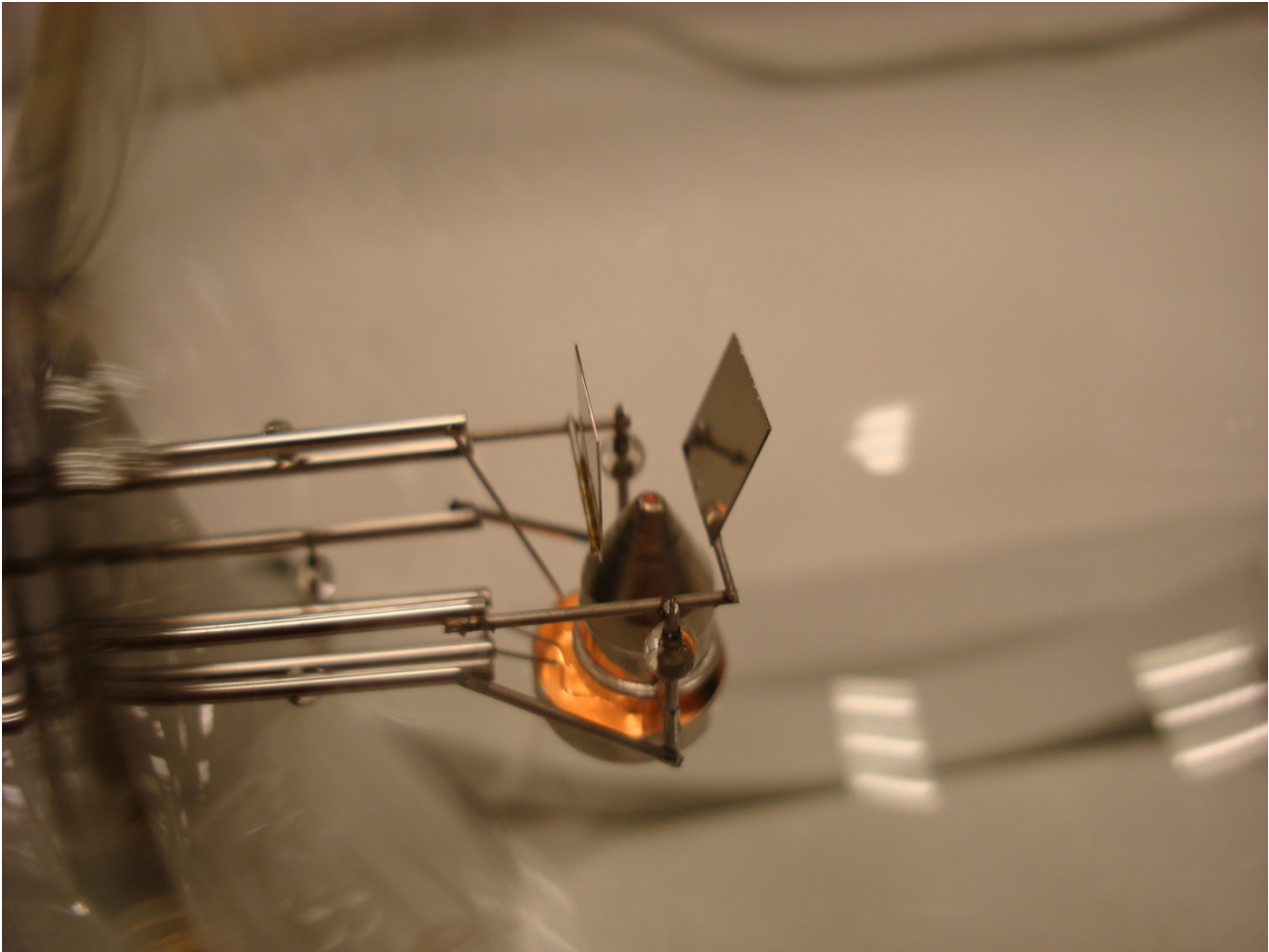
Størrelsen e/m (læses "e over m") står i øvrigt for forholdet mellem elektronens ladning e og dens masse m . Dette forhold bestemmes senere i øvelsen med opstillingen i figur 8.

e/m -røret som accelerator – en kort beskrivelse

En lineær accelerator består af et eller flere accelerationsgab, hvor en elektrisk spænding accelererer ladede partikler til højere fart. For at kunne genbruge accelerationsgabene kan man afbøje de accelererede partikler ved hjælp af magnetfelter, således at partiklerne cirkler i ring og accelereres mere og mere for hver gang de passerer et accelerationsgab. Det giver en cirkulær accelerator. I vores e/m -rør sidder accelerationsgabene inde i røret, mens magnetspoler sidder uden omkring. Selv om vi kan styre elektronerne i røret rundt i en cirkelbevægelse, kan vi ikke genbruge accelerationsgabene. Det skyldes at elektronerne udsendes fra bunden af en "kop". Herefter accelereres de op i en kegle med hul i toppen (fig. 3), hvorefter de kan styres rundt i en næsten cirkelformet bane til de når tilbage til undersiden af koppen (fig. 5). Hvis man skulle genbruge accelerationsgabene mellem koppen og keglen, skulle man lave et hul i bunden af koppen, så elektronerne kunne tage en tur mere rundt i røret. Men det ville ikke være praktisk til det formål, som røret er bygget til. Jo hurtigere elektronerne bevæger sig, jo sværere er de nemlig at afbøje, så hvis man lod elektronerne køre mange gange rundt, ville deres spor danne cirkler med større og større radier efterhånden som elektronerne havde taget flere og flere ture rundt. Bemærk, at den lysende bue i fig. 5 ikke er elektronerne selv, men sporet efter dem. I røret er nemlig en tynd brintgas, som ioniseres, når elektronerne på deres vej rundt i røret støder ind i brintmolekylerne. Når brintmolekylerne gendannes udsendes det blålige lys. Elektronerne taber en lille smule energi ved stødene, så banen bliver ikke helt cirkelformet. Gassen er dog så tynd, at man kan opnå at elektronerne næsten når tilbage til koppen lige under hullet i keglen, som man ser det i fig. 8.

En accelerator på et bord – en kvalitativ undersøgelse

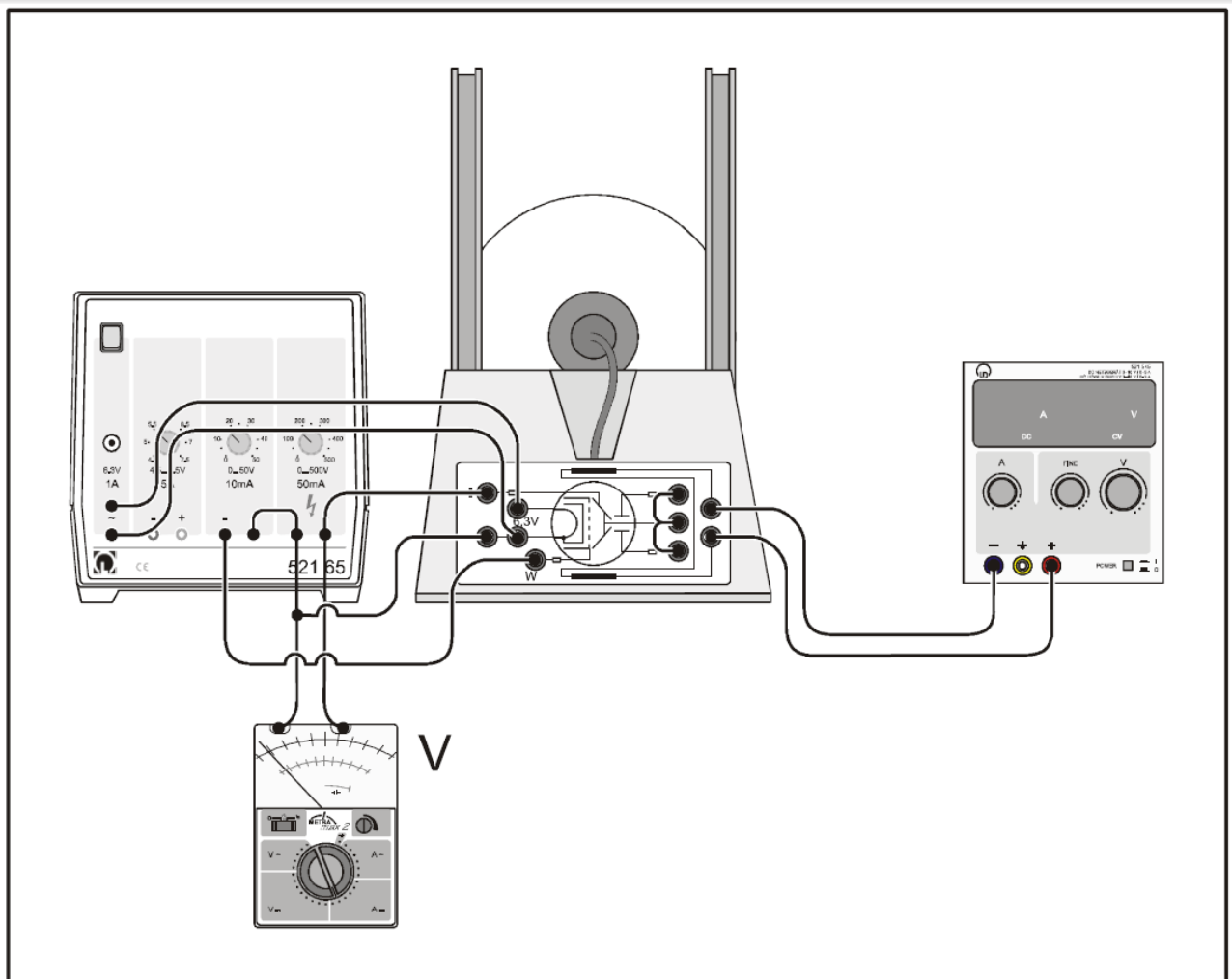
På figur 3 ses et nærbillede af elektronkanonen og figur 5 viser den samlede opstilling med spoler, der leverer magnetfeltet, som afbøjer den accelererede stråle.



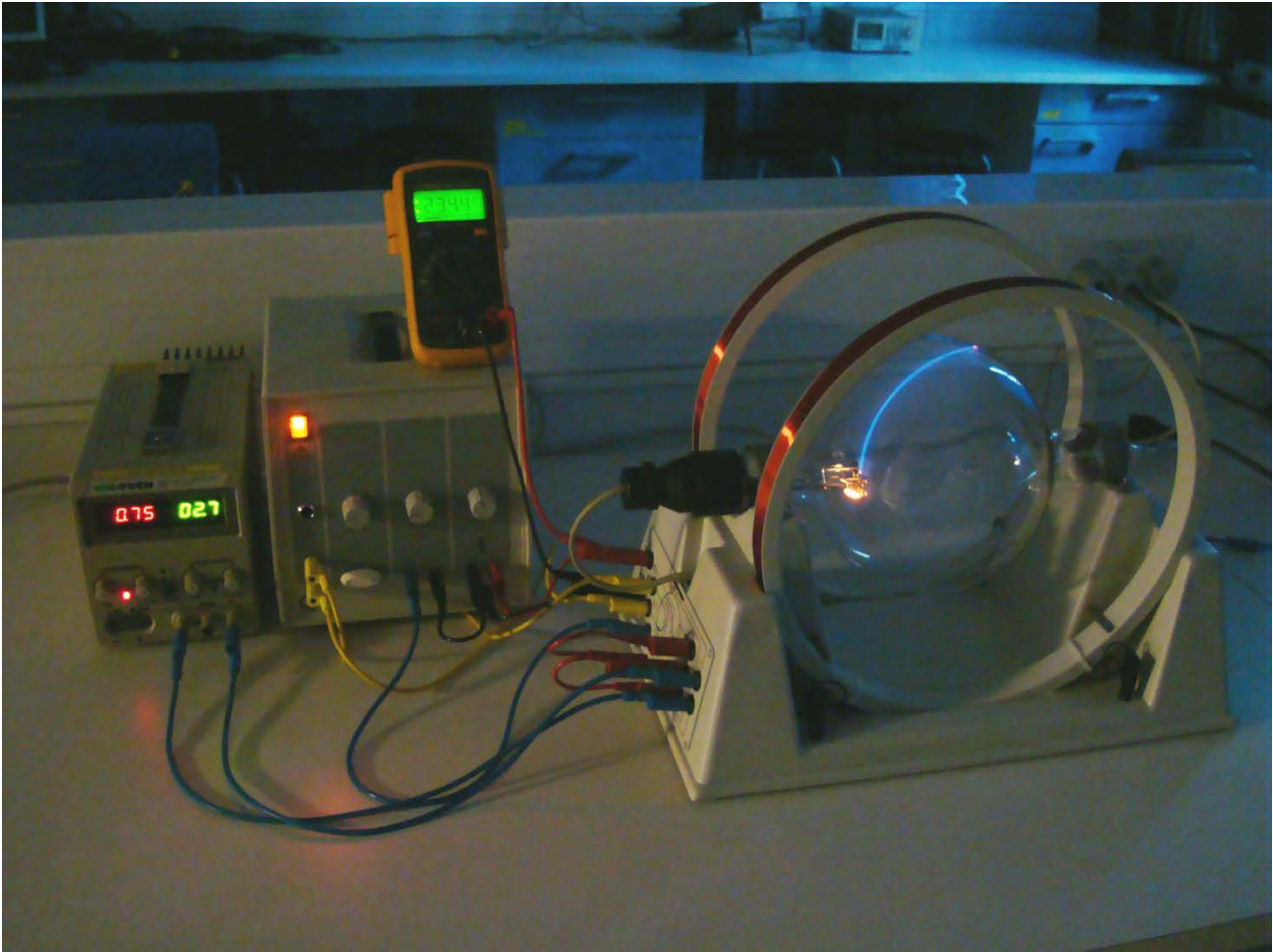
Figur 3. Elektronkanonen i e/m-røret. Elektronerne accelereres mellem den orange-glødende "kop" og den omvendte, hule tragt. Elektronerne trækkes op og ind i tragten af en positiv spænding på nogle hundrede volt. Enkelte af elektronerne vil så ryge ud af hullet i toppen af tragten, som er en afskåret kegle. Uden for tragten sidder plader til elektrisk afbøjning af elektronstrålen. De benyttes ikke særskilt og skal sættes til samme potential som keglen. Hvis der ikke er påtrykt noget magnetfelt vil elektronerne bevæge sig lodret opad. På figur 5 er belysningen dæmpet, et magnetfelt er påtrykt og man ser hvordan strålen af elektroner afbøjes. Det er ikke elektronerne selv, man ser, men sporet efter dem. I røret er nemlig en tynd brintgas, som ioniseres, når elektronerne på deres vej rundt i røret støder ind i brintmolekylerne. Når brintmolekylerne gendannes udsendes det blålige lys.
Foto: Nanoteket, DTU Fysik.



- Bemærk, at I her skal arbejde med højspænding. Højspændingskuben må først tændes, når alle ledninger er sat i.
- Tilkobl røret med ledninger og voltmeter som vist i figur 4.



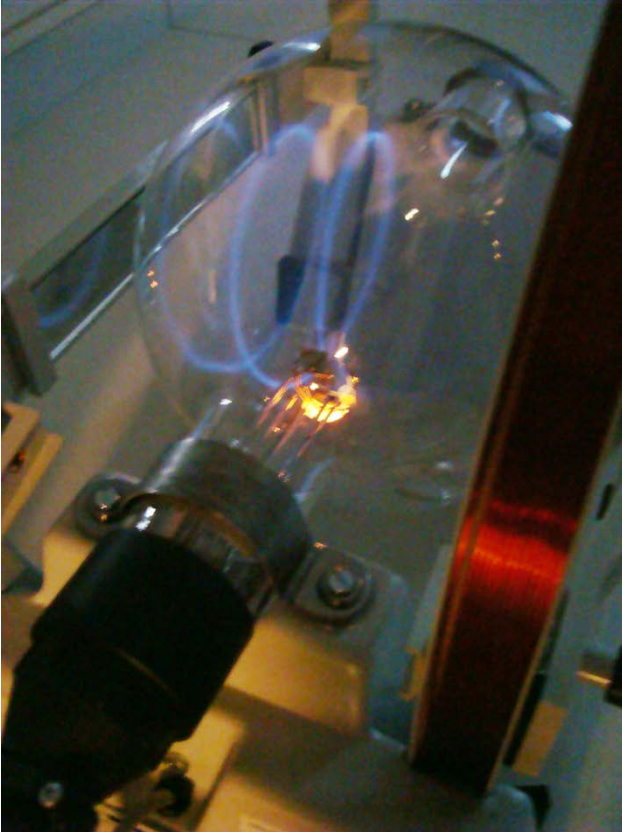
Figur 4. Ledningsføring til forsyning af e/m-røret og Helmholtzspolen. Fra venstre forsynes glødekatoden med 6,3 V vekselstrøm. Fra højre forsynes Helmholtzspolens to delspoler med magnetiseringsstrøm. I midten ses røret fra bagenden med delspoler langs siden. Tegning tilpasset fra: Leybold-Heraeus.



Figur 5. Opstilling til undersøgelse af princippet i en accelerator. Til venstre ses strømforsyningen indstillet på 0,75 A til Helmholtzspolen til højre i billedet. Helmholtzspolen danner et magnetfelt, som afbøjer en elektronstråle. Strålen ses ved sit lysende blå spor i glaskolben. Der hvor strålen rammer kolbens inderside ses en rødviolet plet på rørets overside. Elektronerne i strålen er blevet accelereret op fra den gulligt lysende katode i rørets venstre side (se nærbillede i figur 4). Accelerationsspændingen er nogle hundrede volt og kan aflæses på voltmetret ovenpå spændingskilden. Til sidst i vejledningen benyttes målingerne til beregning af e/m . Foto: Nanoteket, DTU Fysik.

- Tænd for højspændingskuben. Stil gitterspændingen på - 5 volt og accelerationsspændingen på 200 V.
- Katoden begynder straks at lyse op, men der går nogle minutter før den er varm nok til at elektroner kan rives løs. Dette viser sig ved et blåligt lysspor fra keglen lodret op i røret.
- Tænd nu for magnetstrømmen til Helmholtzspolen og sæt den på 1 ampere. Hvad sker der?
- Hvad vil der ske med elektronbanen, hvis man bytter om på magnetstrømretningen. Prøv! Forklar!
- Hvad vil der ske med elektronbanen, hvis man nu øger accelerationsspændingen? Prøv! Forklar!
- Hvad vil der ske med elektronbanen, hvis man nu øger magnetstrømmen (MAX 3 A). Prøv! Forklar!

Sammenhæng mellem helix-vinkel og radius i e/m-røret



Figur 6. Elektronens helix-bane set ovenfra. Til højre i billedet ses den ene delspole i Helmholtzspolen. Helmholtzspolen danner et vandret magnetfelt. Elektronkanonen er stillet lidt på skrå, så elektronstrålen ikke sendes ud af kanonen vinkelret på magnetfeltet. Derved driver elektronstrålen mod væggen. Her kan den reflekteres tilbage mod centrum ved at holde en stærk magnet med et inhomogent felt i nærheden, se figur 8. Foto: Nanoteket.

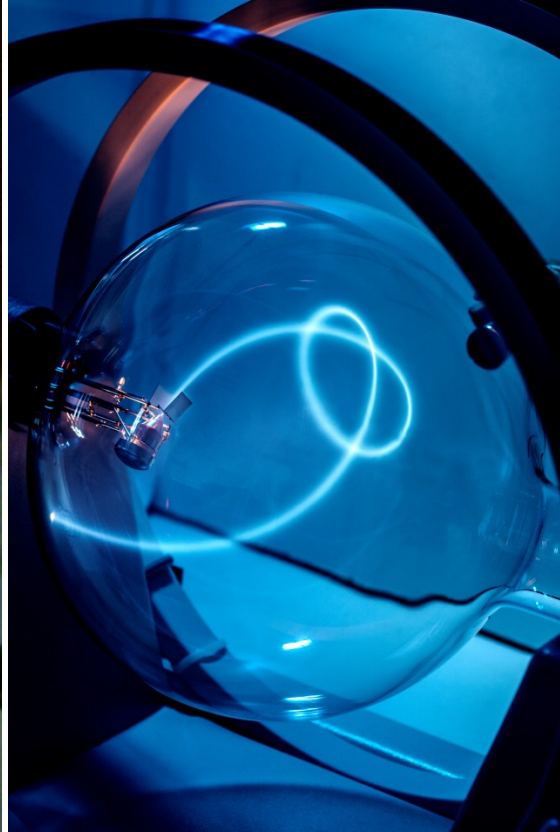
Fra accelerationsspændingen U i elektronkanonen, fås for elektronen

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU.$$

For en skråstillet kanon fås med helix-vinkel theta

$$v_{\perp} = v \cos(\theta).$$

I et magnetfelt, med feltstyrke B , fås så en cirkelbevægelse med radius bestemt ved



Figur 7. Elektronkanonen er skråstillet ind i billedplanet. Strålen reflekteres tilbage fra bagsiden ved hjælp af den stærke permanente magnet, som ses bag Helmholtzspolen. PAS PÅ med magneten, den er MEGET kraftig, så den må ikke komme nær en anden af samme type, da de så smadrer sammen og GÅR I STYKKER. Foto: Mikal Schlosser.

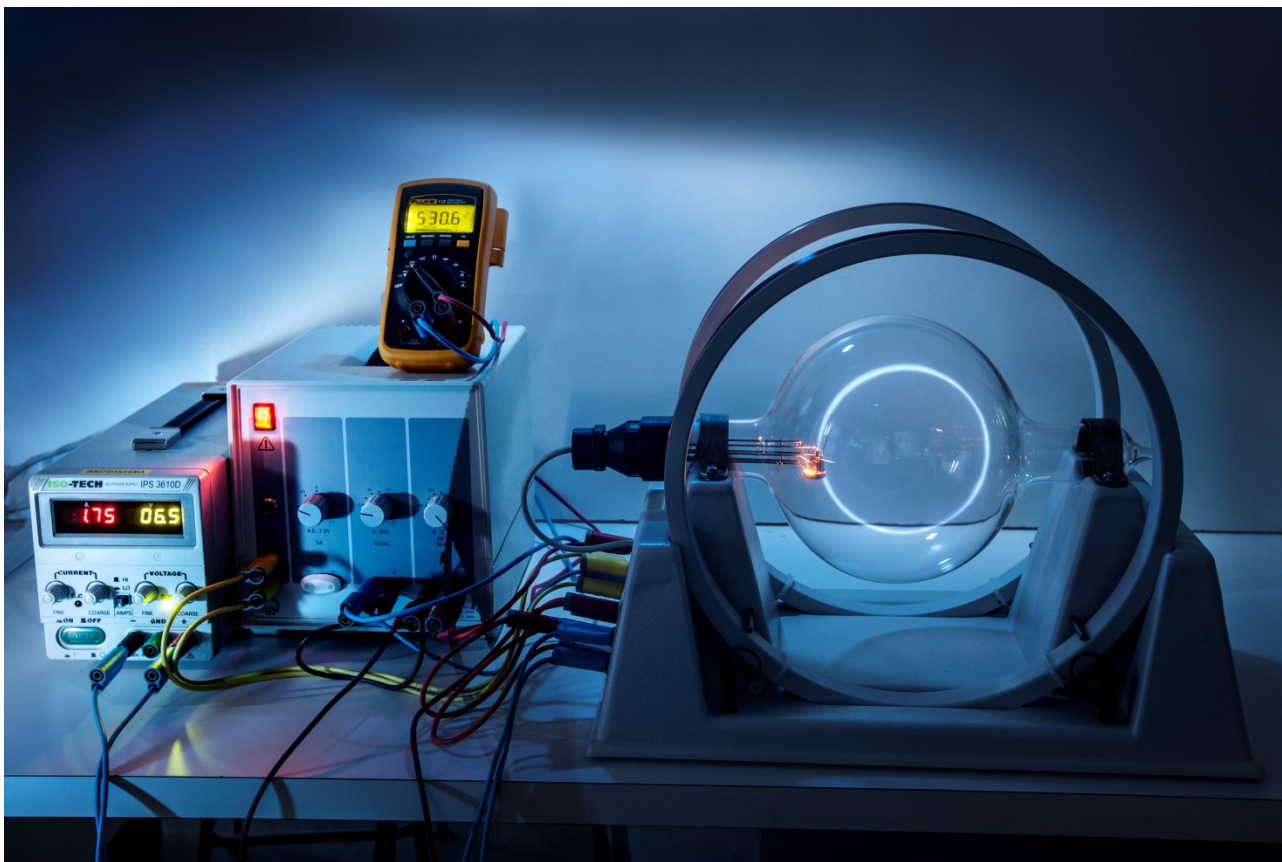
$$m \frac{v_{\perp}^2}{r} = Bev_{\perp}.$$

Kombineres dette får vi sammenhængen mellem radius og cosinus til vinklen

$$r = \sqrt{\frac{m}{e}} \cdot \frac{\sqrt{2U}}{B} \cos(\theta).$$

I må ikke forvente alt for pæne resultater, for B er ikke helt konstant mellem spolerne.

A-niveau: Bestemmelse af e/m



Figur 8. Opstilling til bestemmelse af e/m , dvs. forholdet mellem elektronens ladning og dens masse. Se ledningsdiagram i figur 4. Til venstre ses strømforsyningen indstillet på 1,75 A til Helmholtzspolen til højre i billedet. Helmholtzspolen danner et magnetfelt, som afbøjer en elektronstråle. Strålen ses ved sit lysende blå spor i glaskolben. Baneradius måles med sigteklemmer og spejl, som er afmonteret på fotoet. Elektronerne i strålen er accelereret op fra den gulligt lysende katode i rørets venstre side (se nærbillede i figur 3). Accelerationsspændingen er nogle hundrede volt og kan aflæses på voltmetret ovenpå spændingskilden (530,6 V). Foto: Mikal Schlosser.

Elektronen accelereres af et spændingsfald U , så dens kinetiske energi efter acceleration vil være bestemt ved

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU$$

Efter acceleration i det elektriske felt, træder den ind i et homogent magnetfelt B , som vender vinkelret på dens hastighed v . Den beskriver derved en cirkelbevægelse med radius r under påvirkning af en centripetalkraft givet ved Lorentzkraften, dvs.

$$\frac{mv^2}{r} = Bev$$

Fra de to ovenstående formler kan man udlede det ønskede forhold

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{(Br)^2}$$

Magnetfeltet i Helmholtzspolen er tilnærmelsesvis homogent, fordi spolen er delt i to halvdele med lige mange vindinger $n=130$ og med en afstand mellem de to delspoler lig med spolens radius $R=150$ mm. Feltet midt i spolen er proportionalt med strømstyrken I i spolen

$$B = kI .$$

Feltet væk fra akse er lidt svagere, hvilket betyder at man for en bane med en diameter på 8 centimeter har $k = 6,7 \cdot 10^{-4} T / A$.

Teknisk indskud: På akse gælder $k = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{n}{R} = 7,8 \cdot 10^{-4} T / A$. Den pudsige trehalvte rod af firefemtedele

har sin oprindelse i formelen for feltet langs akse af en enkelt cirkulær vikling med radius R i afstanden x fra vindingens centrum

$$B_{\text{enkeltvikling}} = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

Med afstand R mellem delspolene bliver $x = R / 2$ og ved addition af feltet fra de to delspol kan man så finde det ovenfor angivne udtryk for k på akse midt mellem de to delspol.

- Hvordan skal sammenhængen mellem accelerationsspændingen og magnetfeltstyrken være, hvis man holder baneradius konstant?
- Lav en måleserie, hvor I varierer spændingen så meget, som I kan, og hold banediameteren fast på 8 cm ved at indstille spolestrømmen passende. Tegn (I^2, U) -graf, bestem hældning og herfra e / m .
- Hvordan skal sammenhængen mellem accelerationsspændingen og baneradius være, hvis man holder magnetfeltet konstant?
- Lav en måleserie, hvor I holder strømstyrken fast på 1,5 A. Lav passende graf og bestem e / m .
- Elektroner kan ikke vejes direkte. Millikan fandt ved uafhængige forsøg $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$. Beregn elektronens masse.

Hjemmesider:

ITER : <https://www.iter.org/album/Media/7%20-%20Technical>

Wendelstein 7-x: <http://www.ipp.mpg.de/16900/w7x>

Videoer:

ITER Fusion Reactor: <https://www.youtube.com/watch?v=zqc0--qoa5A>

ITER Assembly – In- Vessel Components: <https://www.youtube.com/watch?v=pt70mO2nQac>

Nuclear Fusion Animation: <https://www.youtube.com/watch?v=I9HXAXXyU0U>