

Den chockerande darrålen

Nils Patriksson, Patrik Hybelius

12 november 2021

Elektriciteten finns överallt runtomkring oss, i bilar, mobiler och byggnader. Dessutom finns även elektricitet i naturen och inte bara då i blixtar och åskväder. Det finns nämligen djur som kan generera ström och spänning. Vissa fiskar använder elektricitet för att jaga, hitta bytesdjur, kommunicera och se vad som finns runt omkring. Följ med på en resa in i amazonas djupaste djungel och upptäck de fysikaliska fenomen som gett den elektriska darrålen sitt latinska namn “*Electrophorus Electricus*”.

Människan har känt till elektricitet och dess koppling till vissa djur i tusentals år. Texter från forntida Egypten daterade 2750 f.v.t. beskriver till exempel darrmalen som ”Nilens Åsa”. Faktiskt är många fiskar elektroreceptiva, vilket innebär att de har ett till sinne som låter dem känna det elektriska fältet kring sig och använda det för att navigera och upptäcka andra fiskar. Elektriska fiskar kan också själva generera ett elektriskt fält med hjälp av speciella elektriska organ. Svaga elektriska strömmar används primärt för att navigera och kommunicera, medan starka strömmar kan användas för att jaga och temporärt förlama byten. Darrålen använder både och.

Den elektriska ålen (som egentligen inte är en ål, utan en knivfisk) lever i färskvatten runt Amazonfloden och Ornicofloden i Sydamerika. Darrålen är nästan blind och trivs nära botten i dunkla vattendrag, där den kan ”se” med hjälp av elektroreceptivitet. Honan kan bli upp till 2 meter lång och väga så mycket som 20 kilogram, medan hanen är mycket mindre. Vissa darrålar kan generera en ström på 1 ampere under 2 millisekunder. Trots att strömstyrkan är tillräcklig för att döda en människa, är darrålen ofarlig, eftersom strömmen varar under så kort tid. En stöt från darrålen kan istället, likt en elpistol, tillfälligt förlama sitt offer (och göra väldigt ont).

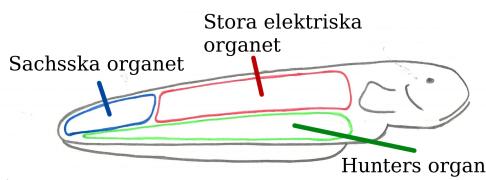


Figur 1: Två darrålar på Universum i Göteborg

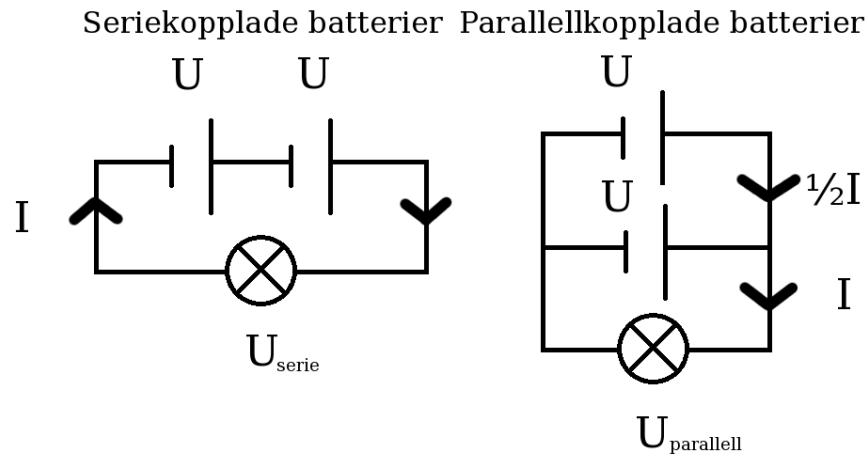
Det simmande batteriet

Darrålen har tre elektriska organ, det stora elektriska organet, Sachsska organet och Hunters organ. Dessa tre organ tar upp cirka 80 procent av darrålens volym, och när en ström ska genereras skapar de en spänning mellan darrålens huvud och bakdel, likt ett stort batteri med pluspol och minuspol.

Organen består av så kallade elektrocyter, en slags diskformade celler som var och en kan generera en spänning på cirka 0,10 V. Spänningen skapas genom att cellen pumpar laddade joner ut ur sig, så att nettoladdningen inuti cellen blir negativ, medan laddningen utanför blir positiv. Då blir både ovansidan och undersidan av cellen positivt laddade. När det är dags att generera ström pumpas positiva joner in genom endast cellens undersida. Över cellen är alltså laddningen fortfarande positiv, medan laddningen under cellen är negativ. Cellen kan liknas vid ett litet batteri, med pluspol ovanför cellen och minuspol under. I darrålens elektriska organ sitter elektrocyterna strukturerade på ett sätt som kan jämföras med ihopkoppling av riktiga batterier.



Figur 2: Illustration av var darrålens olika elektriska organ sitter.



Figur 3: I figuren visas hur strömmen genom en lampa är lika i en parallelkopplad och en seriekopplad krets. I den högra kretsen så blir effekten, och därmed energiåtgången, mycket högre än i den vänstra.

Anta att alla batterier i figur 3 har spänningen U , och att ett ensamt batteri skulle ge upphov till strömmen I över lampan (som har resistans R), enligt Ohms lag,

$$U = R \cdot I.$$

Effekten, P , av det ensamma batteriet skulle då enligt Joules första lag bli

$$P = U \cdot I.$$

Detta är detsamma som energikonsumtionen för kretsen, och en högre effekt ger en högre energiåtgång.

Till vänster i figur 3 visas seriekopplade batterier. Den totala spänningen från dem är detsamma som summan av deras individuella spänningar, det vill säga $U_{serie} = U + U = 2U$. Enligt Ohms lag blir strömmen över lampan $I_{serie} = U_{serie}/R = 2U/R = 2I$. Den sammanlagda effekten i kretsen blir

$$P_{serie} = 2U \cdot 2I = 4P,$$

enligt Joules lag. Energikonsumtionen blir alltså hög i den seriekopplade kretsen.

När batterierna istället är parallellkopplade är spänningen över lampan densamma som med ett enda batteri.

Ohms lag ger att $I_{parallel} = U_{parallel}/R = U/R = I$ Alltså är strömmen genom lampan också densamma som i den enkla kretsen. Den totala effekten blir enligt Joules lag

$$P_{parallel} = I_{parallel} \cdot U_{parallel} = I \cdot U = P.$$

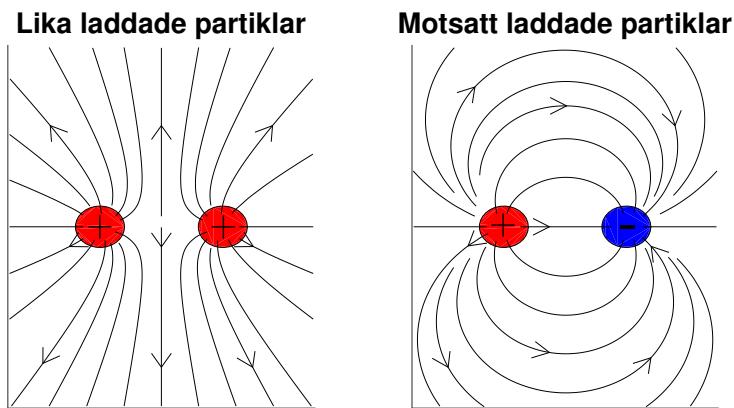
Eftersom effekten här är mindre än i den seriekopplade kretsen kommer parallellkopplade batterier ha lägre energikonsumtion.

Detsamma gäller för elektrocyt-staplarna i den elektriska ålen. Om alla elektrocyter satt i serie skulle strömstyrkan från en chock bli väldigt hög, men skulle också kräva väldigt mycket energi. Darrålens organ har istället en optimierad balans mellan seriekopplade och parallellkopplade staplar av elektrocyter. Tillräckligt mycket seriekopplat för att kunna komma upp i lagom hög spänning och strömstyrka, men tillräckligt med parallellkopplat för att inte utmatta darrålen för fort.

Antalet seriekopplade elektrocyter i en stapel är vanligvis runt 5000. Parallellkopplade staplar ändrar som sagt inte spänningen. Om varje cell kan generera en spänning på cirka 0,10 V innebär det en total spänning på runt 500 V, liksom mer än dubbelt så högt som i ett vanligt eluttag. Denna spänning och en strömstyrka på 1 A ger en urladdning med en effekt på $1 \text{ A} \times 500 \text{ V} = 500 \text{ W}$. Detta motsvarar ungefär 8 glödlampor, eller en människa under kort, intensiv träning. Hur kan då en 20 kg tung darrål ge ut lika hög effekt som en människa på 80 kg? Svaret ligger i att darrålens urladdning endast varar i 2 millisekunder. Enligt formeln $E = Pt$, som betyder att energin är effekten multiplicerat med tiden, är energin i en urladdning ungefär 1 J. En fisk som väger 10 g har ett energiinnehåll på 80 kJ. Om en darrål skulle äta en sådan fisk och tillgodogöra sig all energi skulle det därmed räcka till 80 000 urladdningar. Det är alltså ingenting att spara på.

Det sjätte sinnet

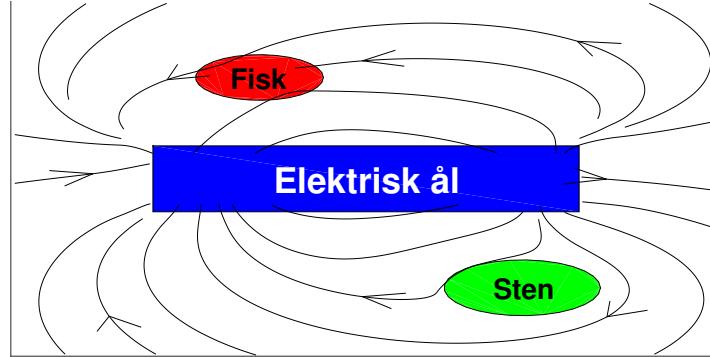
I Amazonas ljusfattiga vatten är ögon mindre användbara än organ som kan känna av andra fysikaliska fenomen, till exempel elektricitet. Darrålen har därför utvecklat förmågan att känna elektriska fält, electroreception. Däremot fungerar deras ögon dåligt. Ett elektriskt fält uppkommer då partiklar påverkar varandra med en elektromagnetisk kraft, ungefär som när jorden påverkar månen med gravitation. Jordens gravitationsfält beskriver hur jorden genom gravitation påverkar föremål i dess omgivning. På samma sätt har en laddad partikel ett elektriskt fält som beskriver hur partikeln påverkar andra partiklar i sin närhet. Två partiklar med lika laddning repellerar varandra, medan två partiklar med olika laddning attraherar varandra. Figur 4 visar hur det elektriska fältet ser ut runt två positivt laddade respektive en positivt och en negativt laddad partikel. Fälten illustreras med hjälp av fältpilar, som visar den elektriska kraftens riktning i varje punkt. Notera att detta inte är detsamma som strömriktningen, det vill säga vilken väg laddade partiklar skulle åka om de befann sig i fältet.



Figur 4: Elektriskt fält runt par av laddade partiklar. Fältpilarna visar vilken riktning kraften på en positivt laddad partikel skulle ha i en given punkt. Viktigt att observera är att pilarna visar kraftriktningen, inte strömriktningen.

Precis som att människor behöver tända en lampa i ett mörkt rum för att se, behöver darrålen ett elektriskt fält för att uppfatta omvärlden. Det Sachsska organet genererar en kontinuerlig, svag ström som ger upphov till ett sådant elektriskt fält. Det är inte bara närvaren av ett elektriskt fält darrålen kan känna, utan även hur det ser ut. Föremål som befinner sig i fältet påverkar det, även om de inte är laddade. Ett objekt som leder ström bra kommer dra till sig fältpilarna, medan ett objekt som leder ström dåligt stöter bort pilarna. Figur 5 är en schematisk bild som illustrerar detta. Figuren visar en fisk som leder ström bra och en sten som leder ström dåligt, i darrålens elektriska fält. Darrålens huvud är pluspol och till höger i figuren.

Ål med objekt i elektriskt fält



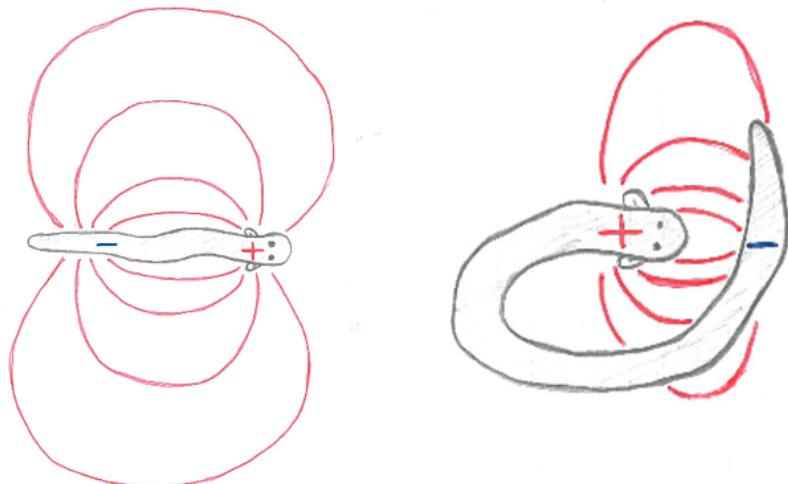
Figur 5: Schematisk bild av det elektriska fältet runt en darrål. Fältpilarna böjs mot fisken, som leder ström bra, och böjs från stenen, som leder ström dåligt. Bilden genererades i Matlab genom att ålen emulerades som en samling laddade partiklar. Ålens huvud är åt höger, och ju närmre huvudet desto större positiv laddning fick partiklarna. För svansen åt vänster gäller motsvarande med negativa laddningar. Laddningarnas elektriska fält adderas, varefter fisken och stenen fick påverka fältpilarna attraktivt respektive frånstötande.

Runt darrålen flödar mer än bara vatten

Utöver det elektriska fältet är själva strömmen användbar för ålen. Även den påverkas av ålens omgivning. Om spänningen jämförs med ”viljan” för laddningarna att röra sig från pluspol till minuspol är resistansen motståndet de möter på vägen. Ohms lag kan användas för att beräkna vattnets ungefärliga resistans. Om spänningen är 500 V och strömmen 1 A, blir vattnets resistans 500 Ω . Om strömmen istället skulle gå genom en fisk, en människa eller en sten skulle resistansen och därmed strömstyrkan variera. Även vattnet kan ha olika resistens beroende på vad som är löst i det. Till exempel har vatten som kommer från kranen ofta en resistans på runt 1000 Ω . Generellt brukar smutsigare vatten ha lägre resistans då det innehåller mer salter och mineraler.

Olika sjöar och hav har olika mängder salt i sig. I Amazonas djungel är vattnet inte särskilt salt, inte heller i till exempel Vänern i Sverige. Den genomsnittliga salthalten i världshavet är 3 % men i vatten som kommer från regn eller smälvtvatten kan salthalten vara så låg som 0,5 %. Om darrålen kunde överleva i andra sorters vatten skulle deras salthalter ha stor inverkan på fiskens elektriska förmågor. Havens högre salthalt kan därför verka fördelaktig för darrålen. I havsvatten skulle resistansen mellan darrålens huvud och bakdel nämligen vara runt 0,5 Ω . Strömmen darrålen hade genererat i havsvatten skulle kunna fås av $I = U/R = 500 \text{ V}/0,5 \Omega = 1000 \text{ A}$. Detta är en extremt hög strömstyrka, och skulle inte uppstå i verkligheten. Till exempel skulle vattnets temperatur och resistans öka väldigt snabbt och strömstyrkan sjunka. Trots allt skulle ström-

styrkan i saltvatten bli mycket högre än i sötvatten, vilket kan verka gynnsamt för darrålen. Om vattnet leder ström så bra, kommer däremot andra fiskar runt darrålen inte få lika hög ström genom sig. Detta eftersom strömmen tenderar att välja den väg med lägst resistans. Dessutom skulle urladdningarna enligt Joules lag kosta darrålen mer energi, då spänningen är densamma som tidigare, medan strömmen nu är flera gånger starkare. Det finns alltså många anledningar för darrålen att hålla sig till sötvatten.



Figur 6: En schematisk bild över hur darrålen rullar ihop sig för att få mer ström att flöda på ett mindre område. Till vänster är den utsträckt och strömmen är utspridd. Till höger går strömmen tätt mellan darrålens två ändar.

Darrålen är även på andra sätt bra på att utnyttja de fysikaliska lagarna för att fånga byten. I alla djurs kroppar används elektricitet via nervsystemet för att styra när musklerna ska röra sig. En elektrisk signal skickas till en muskel, varpå muskeln reagerar och drar ihop sig. När darrålen attackerar ett byte skickar den ut många starka elektriska strömpulser. Då tvingas bytets muskler att dra ihop sig. Om en människa gör många armhävningar väldigt snabbt blir musklerna trötta. På precis samma sätt blir djurs muskler trötta efter upprepat hårt arbete. Darrålens pulser utmattar och paralyserar bytet.

När bytet är paralyserat försöker darrålen suga in det i sin mun och svälja det. Bytets paralysering kan dock gå över fort. Darrålen måste alltså ibland få strömmen genom fisken att bli starkare, och gör det genom att rulla ihop sig runt fisken. Figur 6 är schematisk och illustrerar strömtätheten runt darrålen. Tätare linjer symboliseras högre strömstyrka. När darrålen är rakt utsträckt sprider strömmen ut sig mycket, som syns till vänster i figuren. Närmast darrålen är strömstyrkan störst men avtar med avståndet. När den istället rullar ihop sig som till höger i figur 6 koncentreras strömmen mellan huvudet och bakänden. Därmed kan darrålen återigen paralysera bytet och till slut svälja det helt.

Djup och ogenomtränglig är Amazonas regnskog. Långt in i de gigantiska flodsystemen finns tusentals arter av djur som simmar runt. Någonting rör sig i det en meter djupa vattnet. Det är ett långsmalt rovdjur på jakt. Elektrisk ström flödar genom vattnet och kartlägger omgivningen. Rätt som det är får rovdjuret nys om ett byte och sänder ut en elchock. Bytet har inte en chans; det är förlamat och kan inte röra sig. Vad är detta för rovdjur? Jo, det är den chockerande darrålen.

Darrålen ingjuter respekt i många men är också fascinerande och spännande. Att kunna framkalla spänning, paralysera andra djur och se helt med hjälp av elektricitet låter som science-fiction. Det är det inte. Det är darrålens vardag.