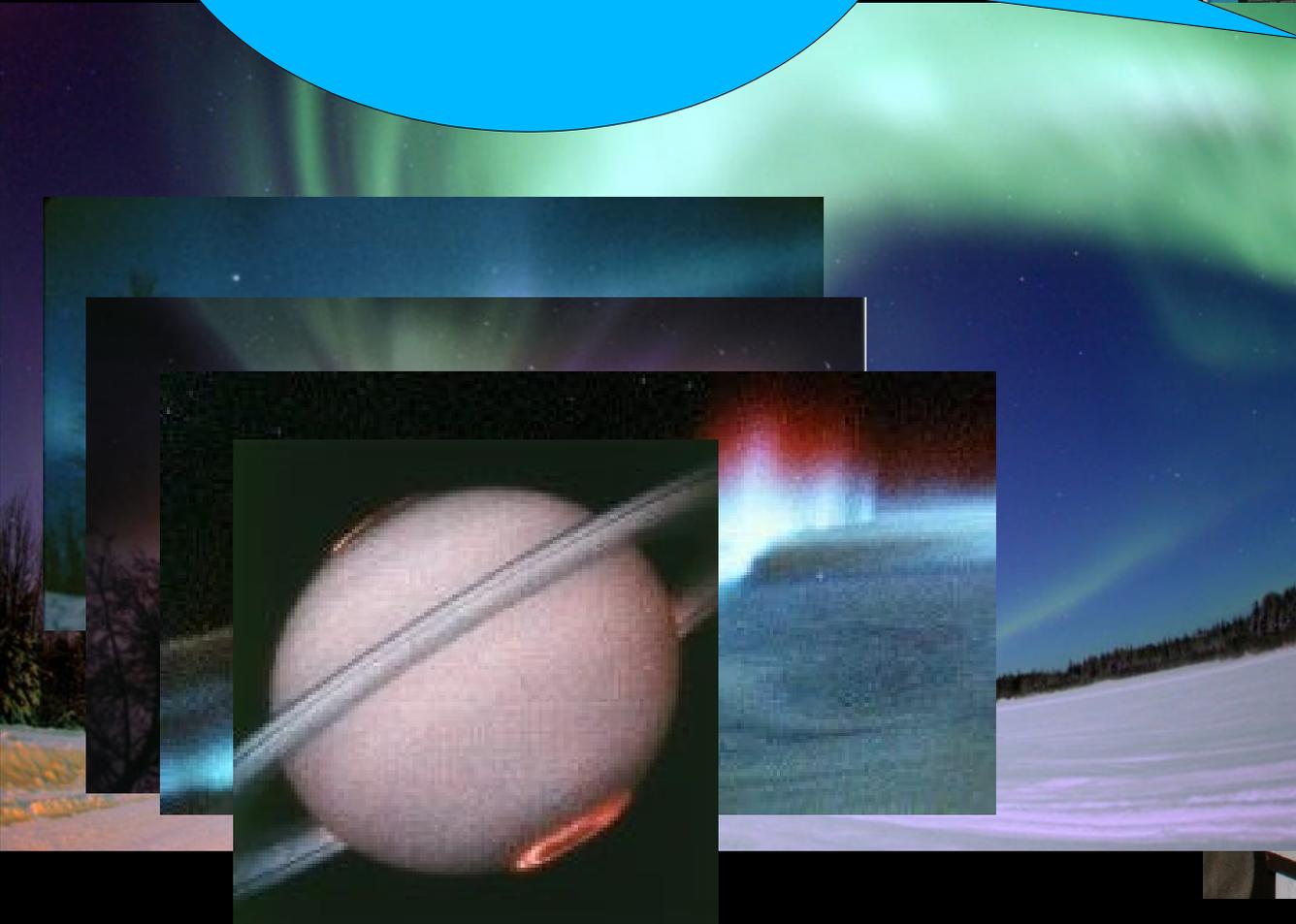
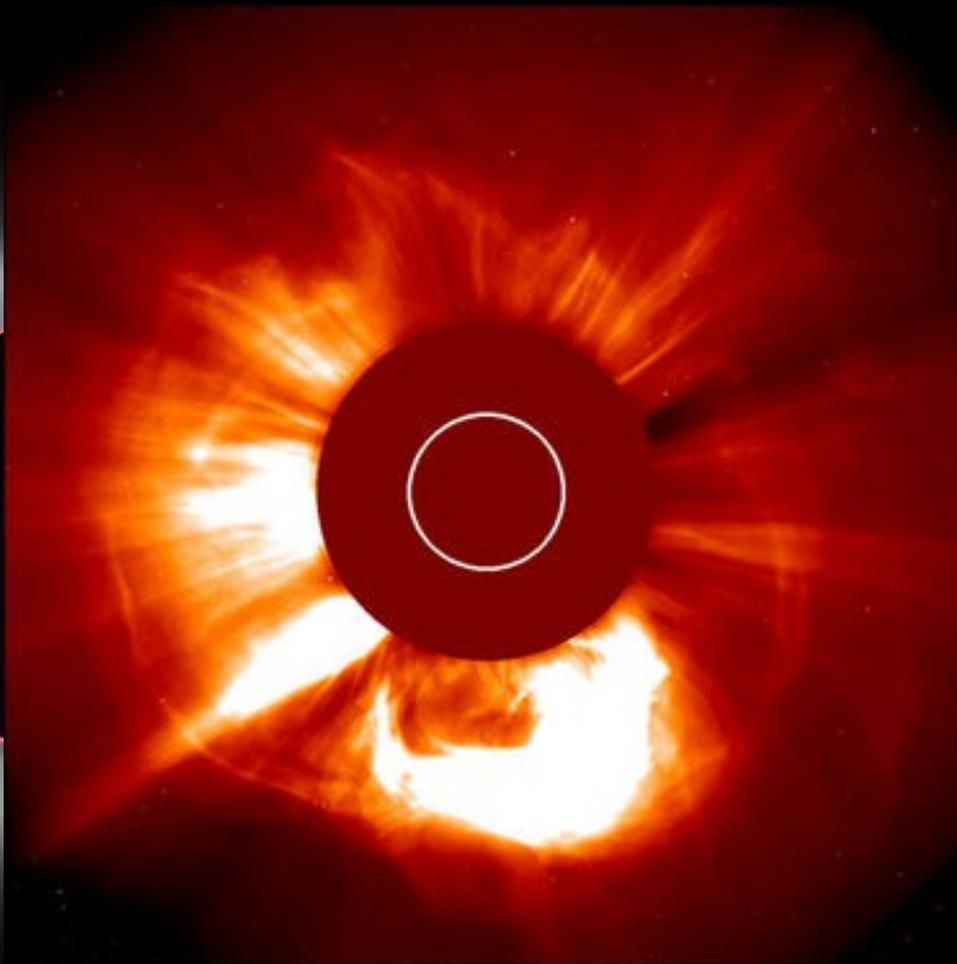


Wir alle tragen die
Sonne in unseren
Herzen!



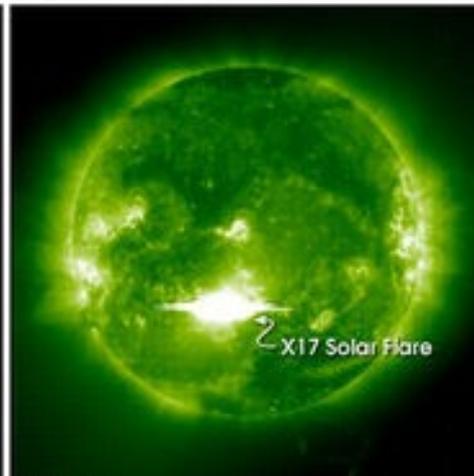


11:30 UTC Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO)



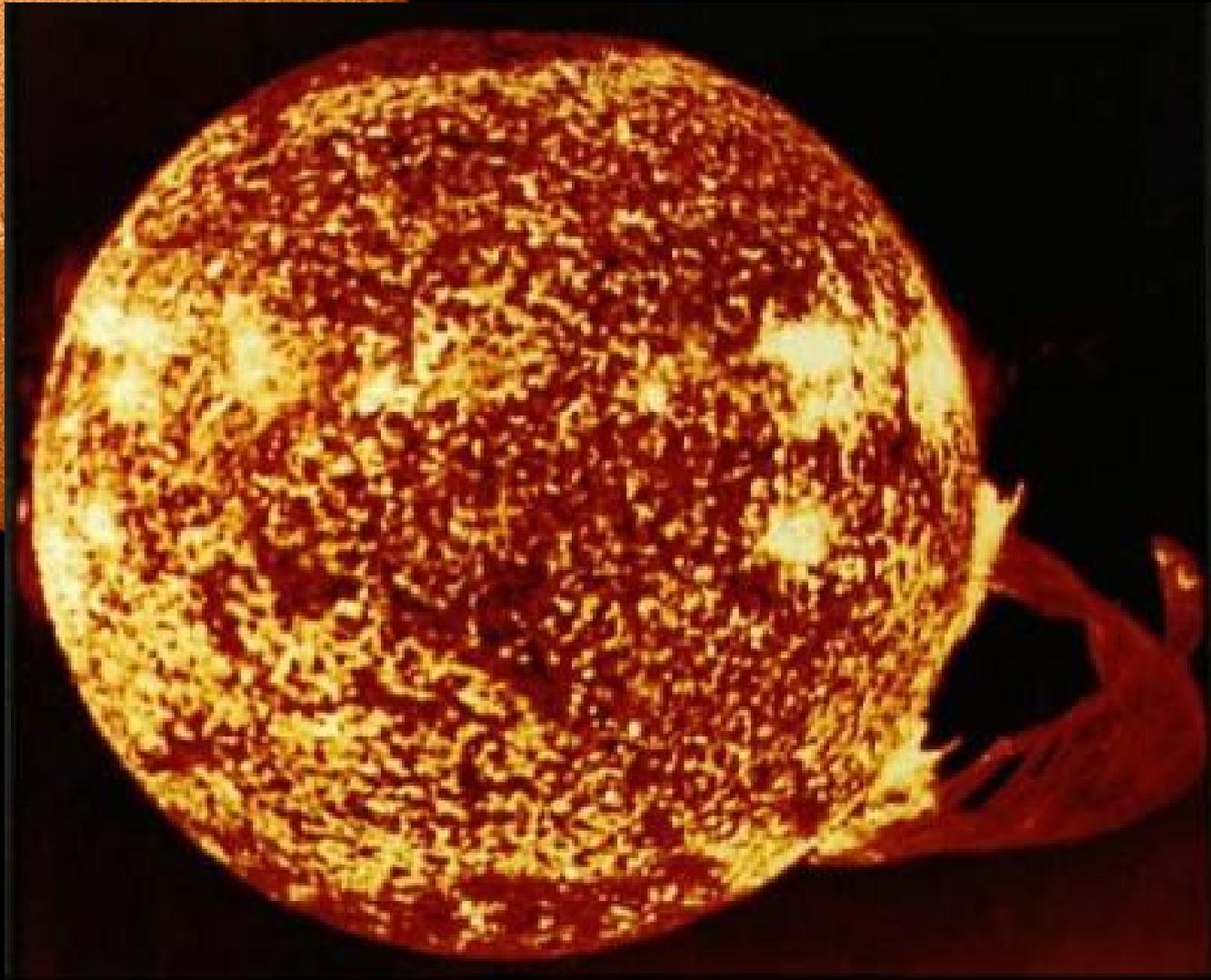
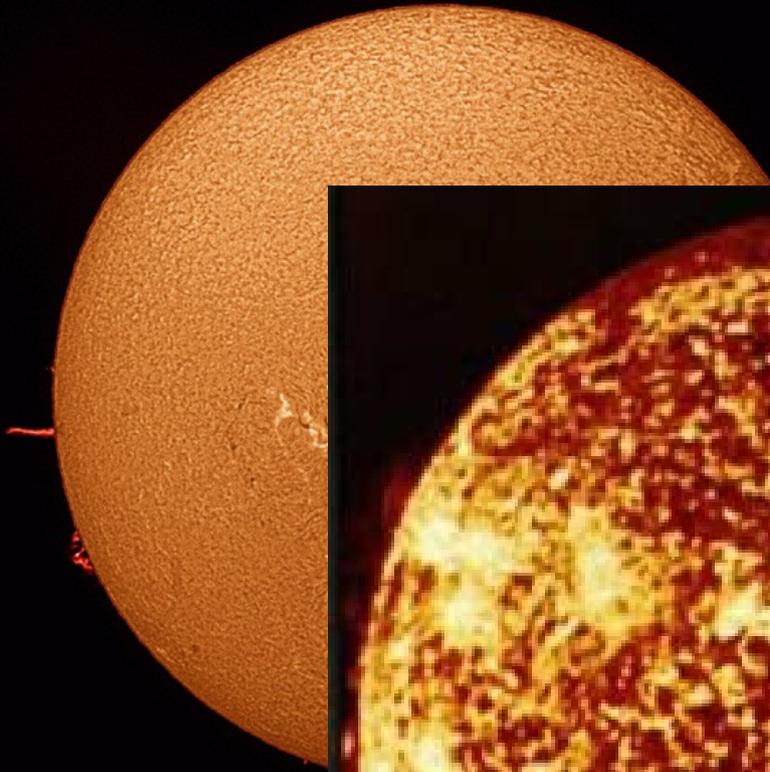
Sunspot Region 486

11:24
Michelson Doppler Imager (MDI)

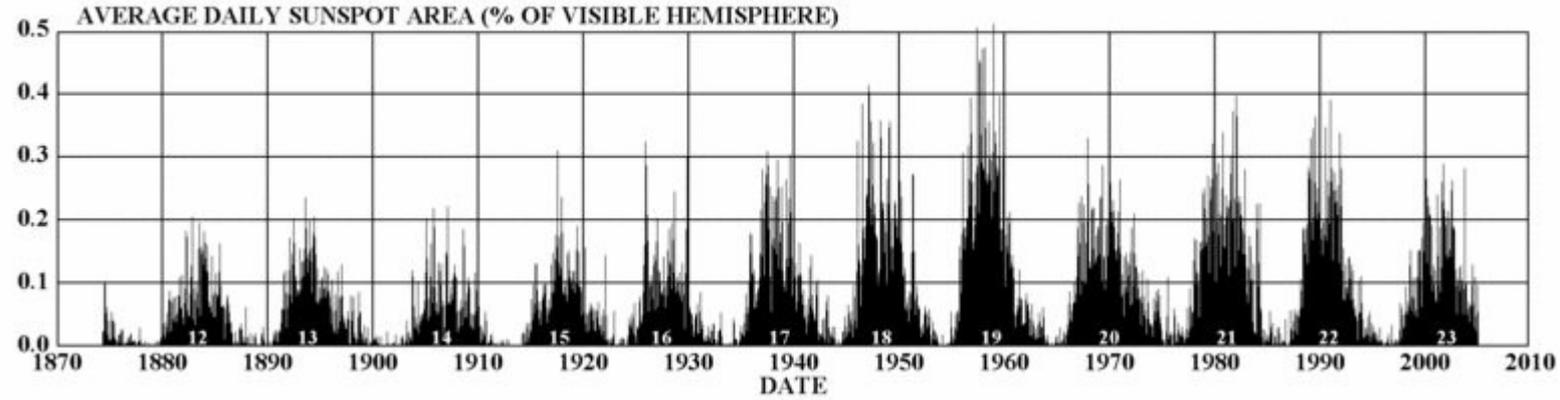
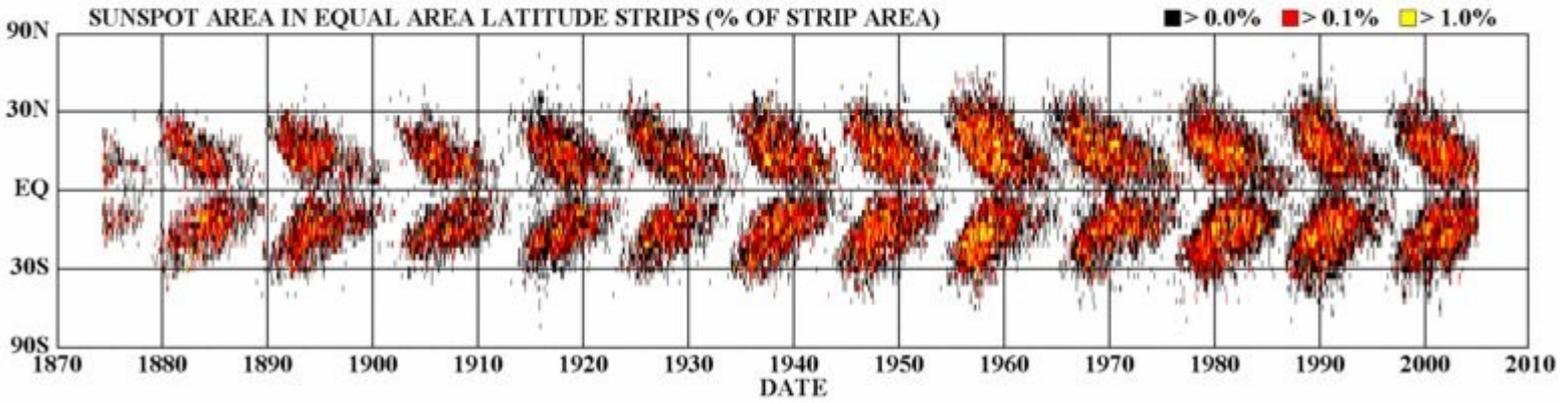


X17 Solar Flare

11:12 UTC
Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (EIT)

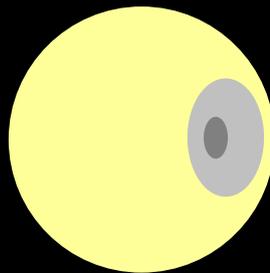
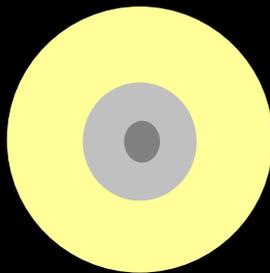
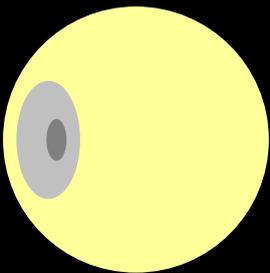
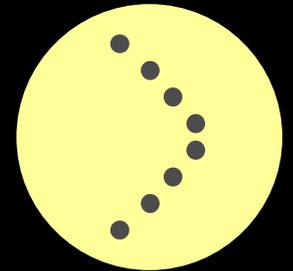
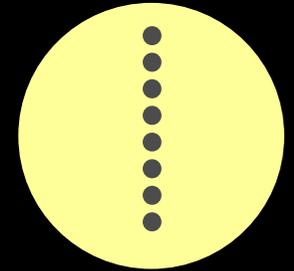


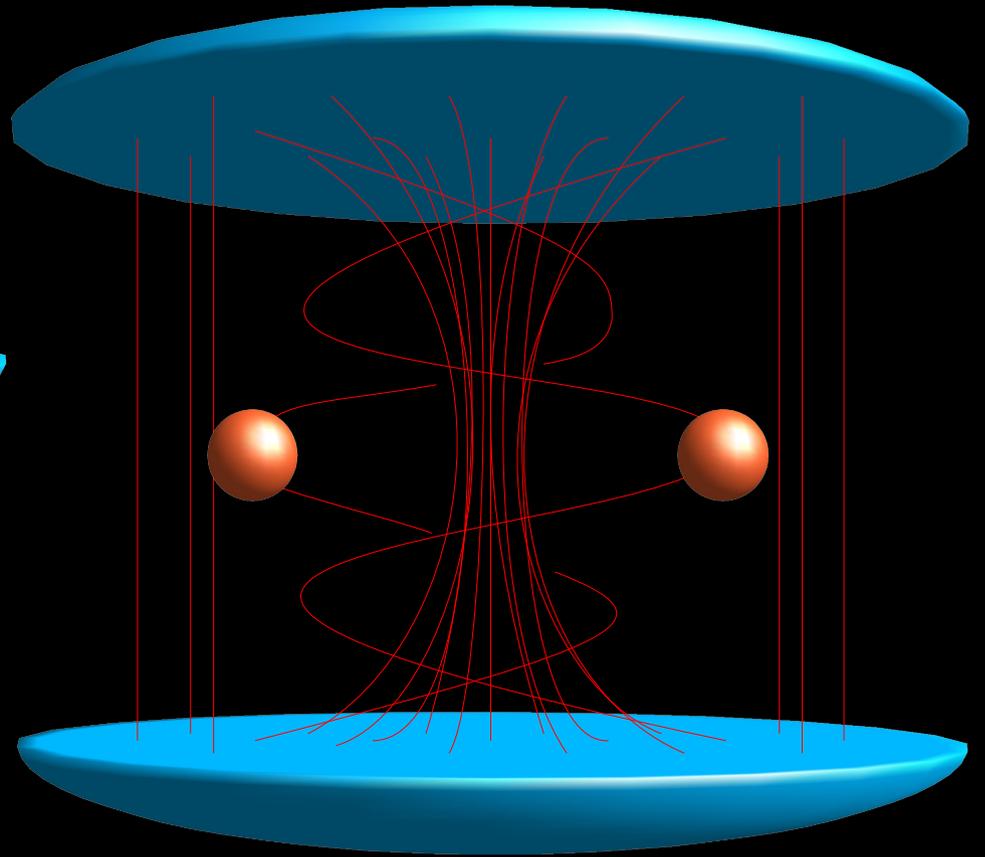
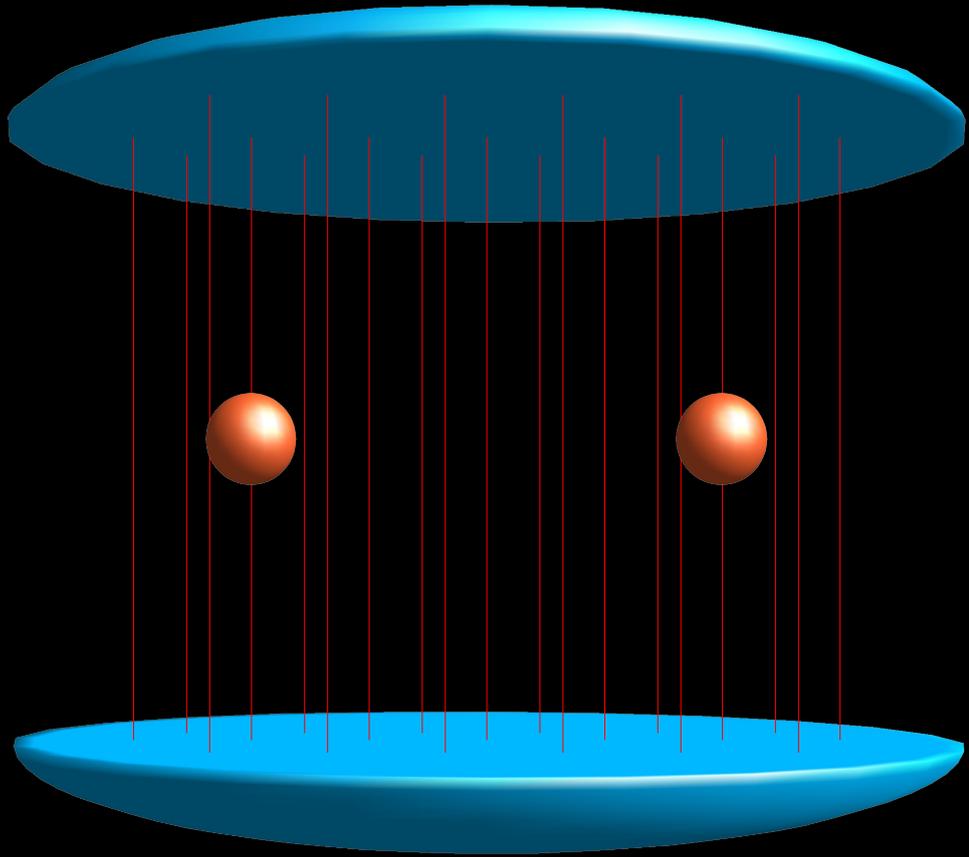
DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS

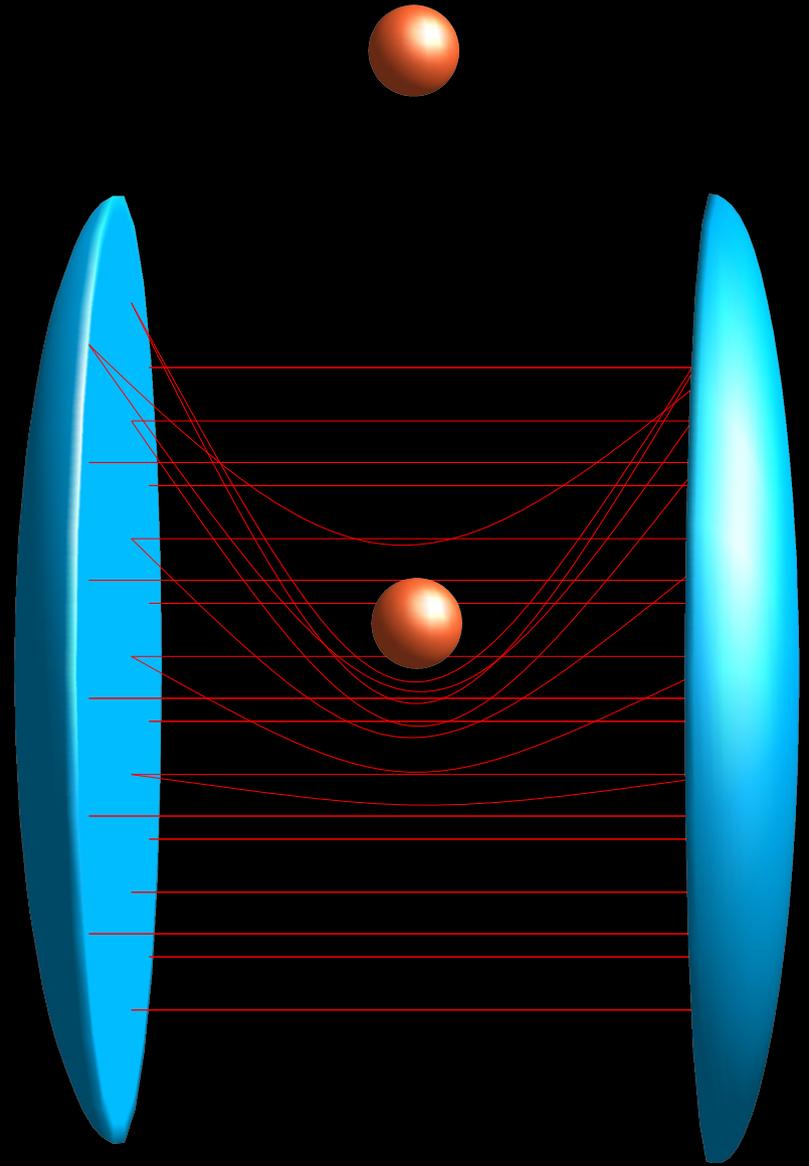
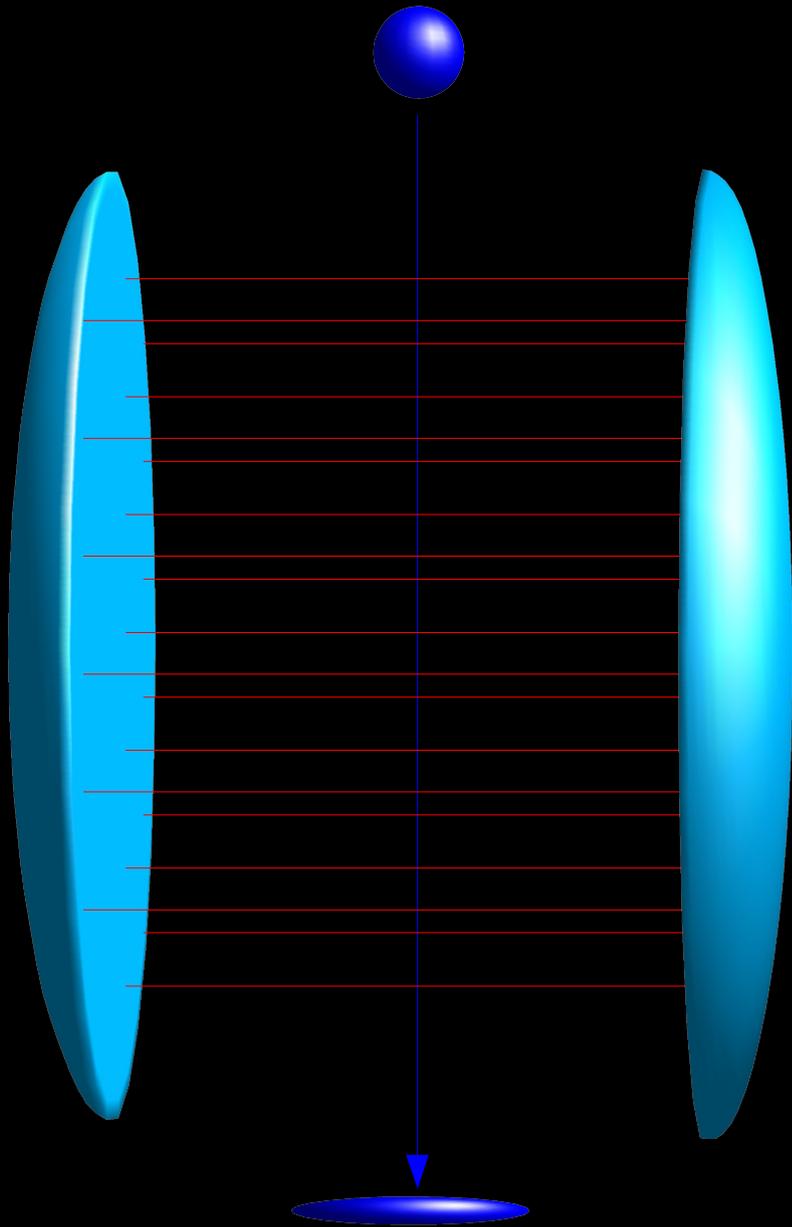


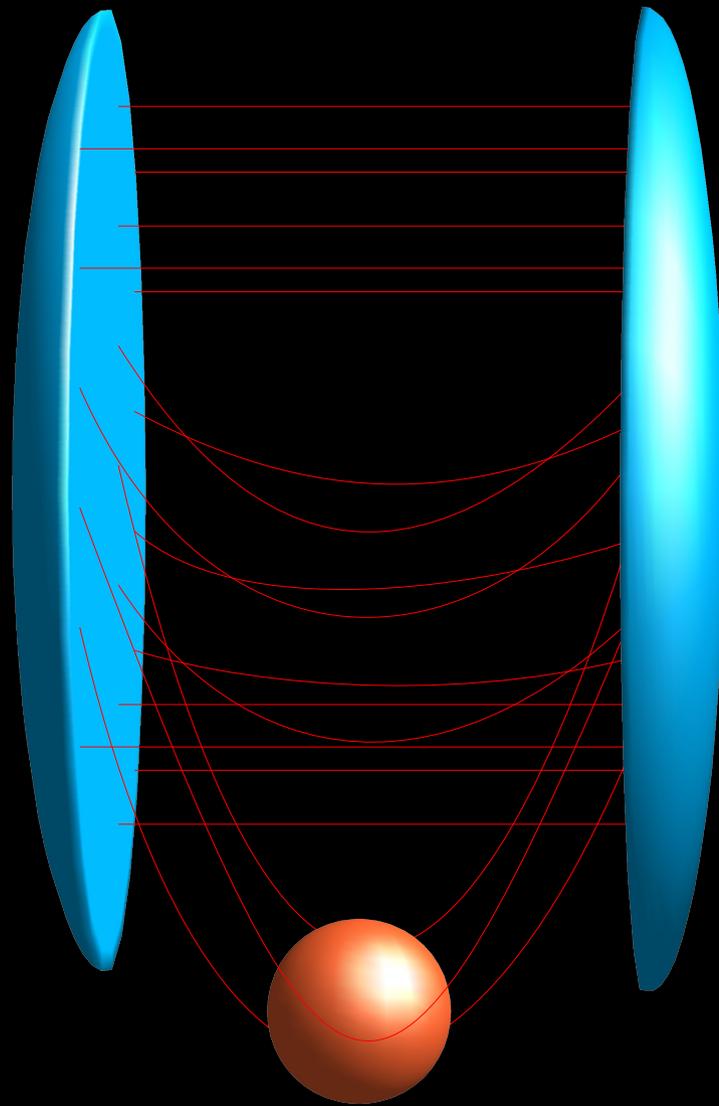
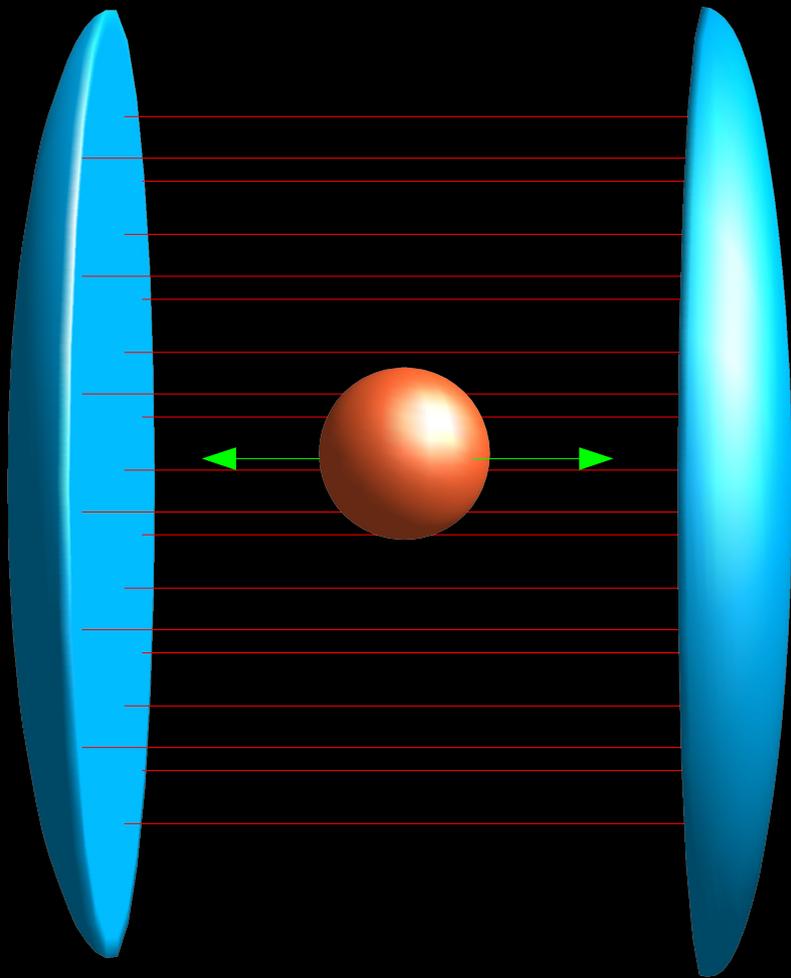
<http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/bfv.gif>

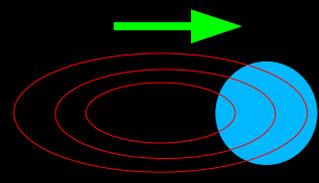
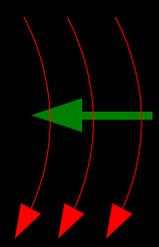
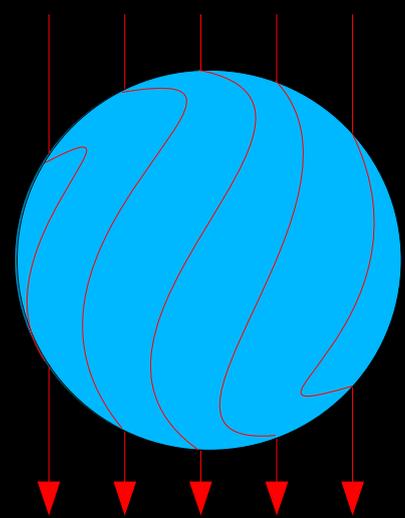
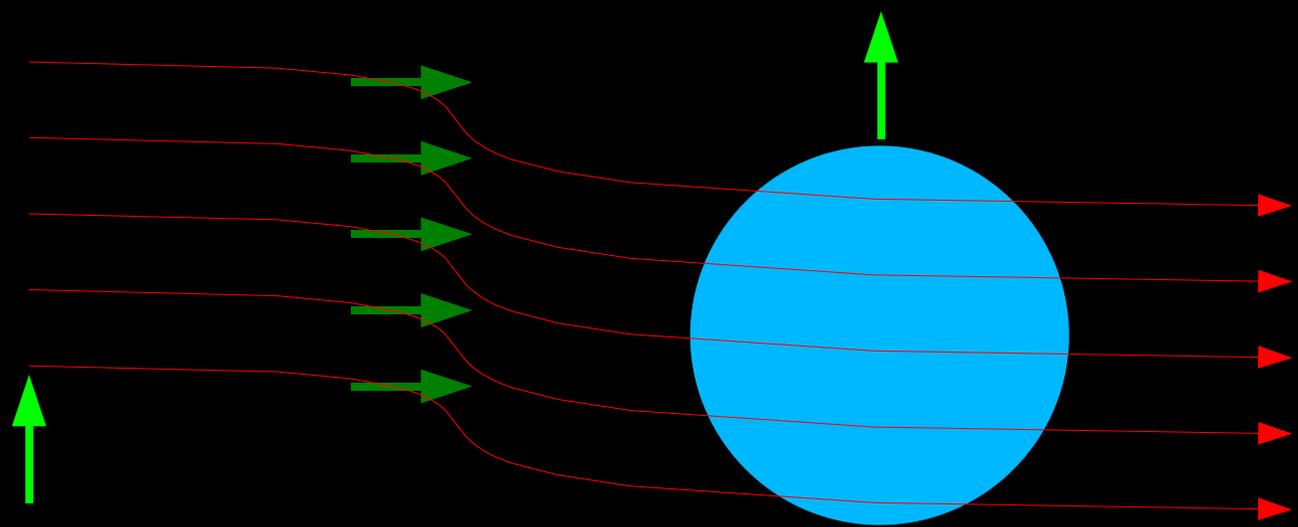
NASA/NSSTC/HATHAWAY 2005/03

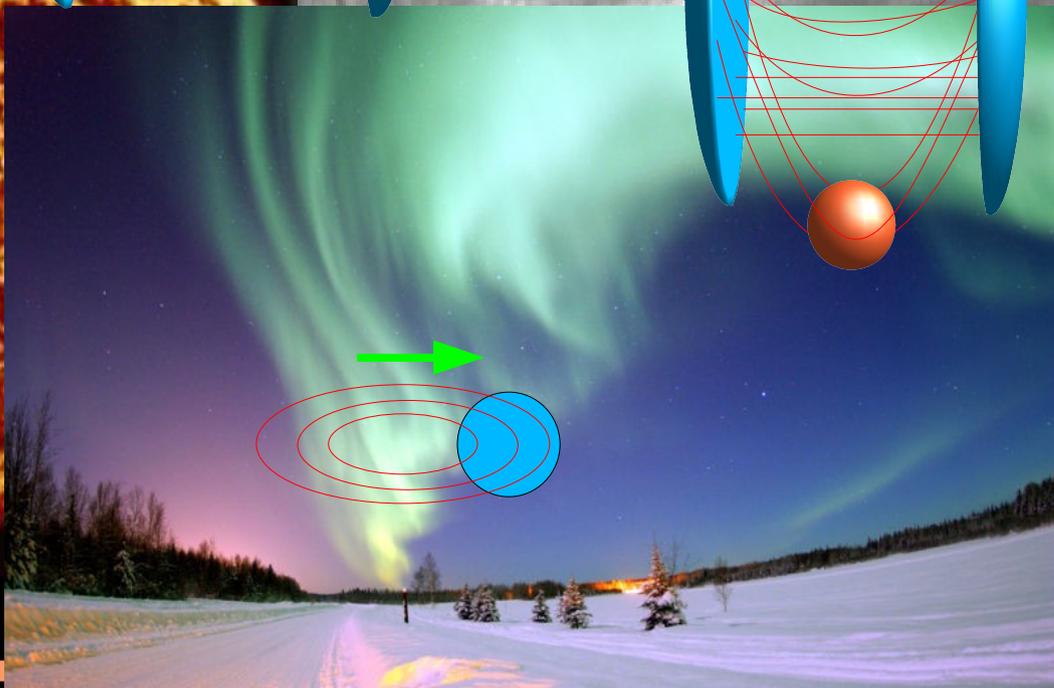
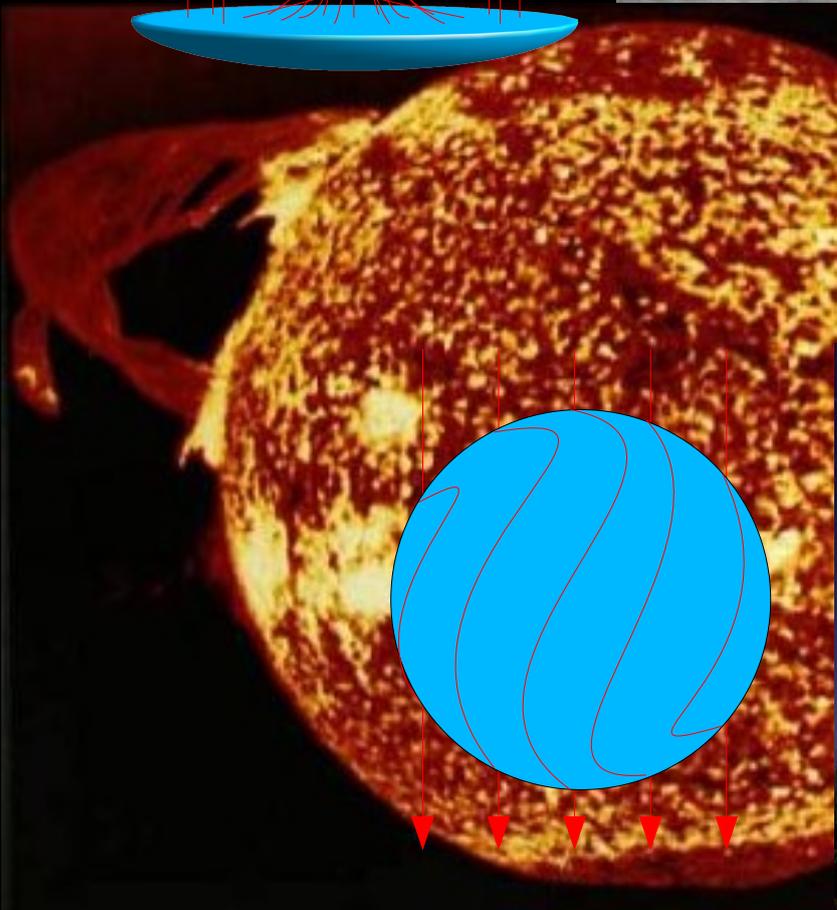
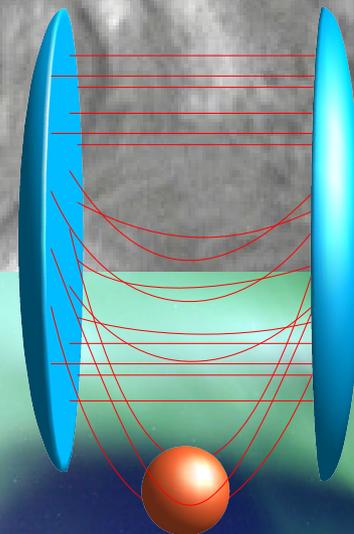
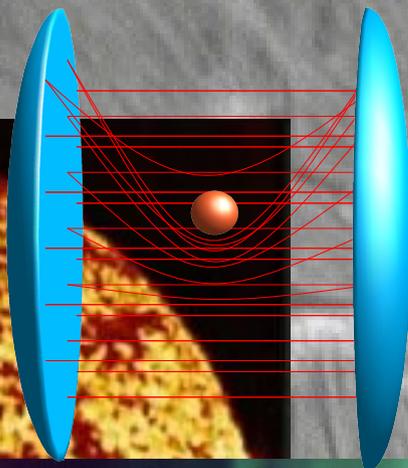
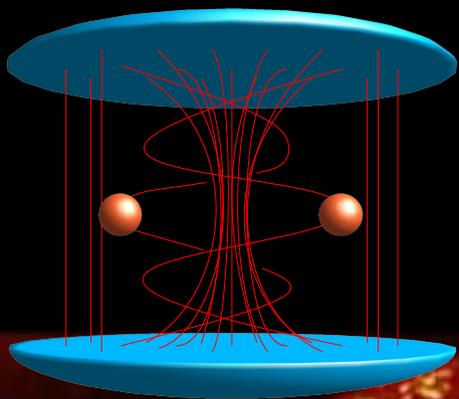
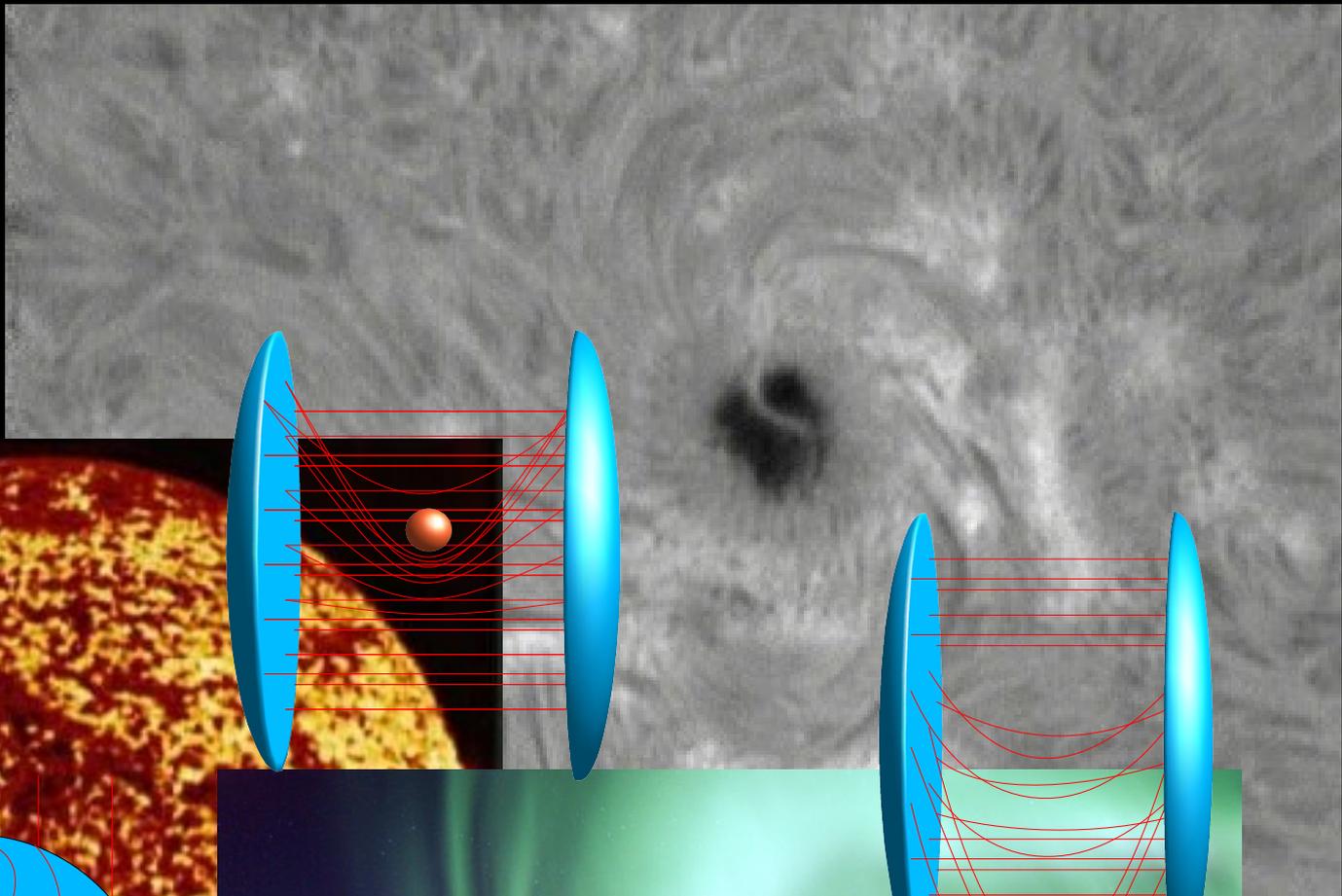


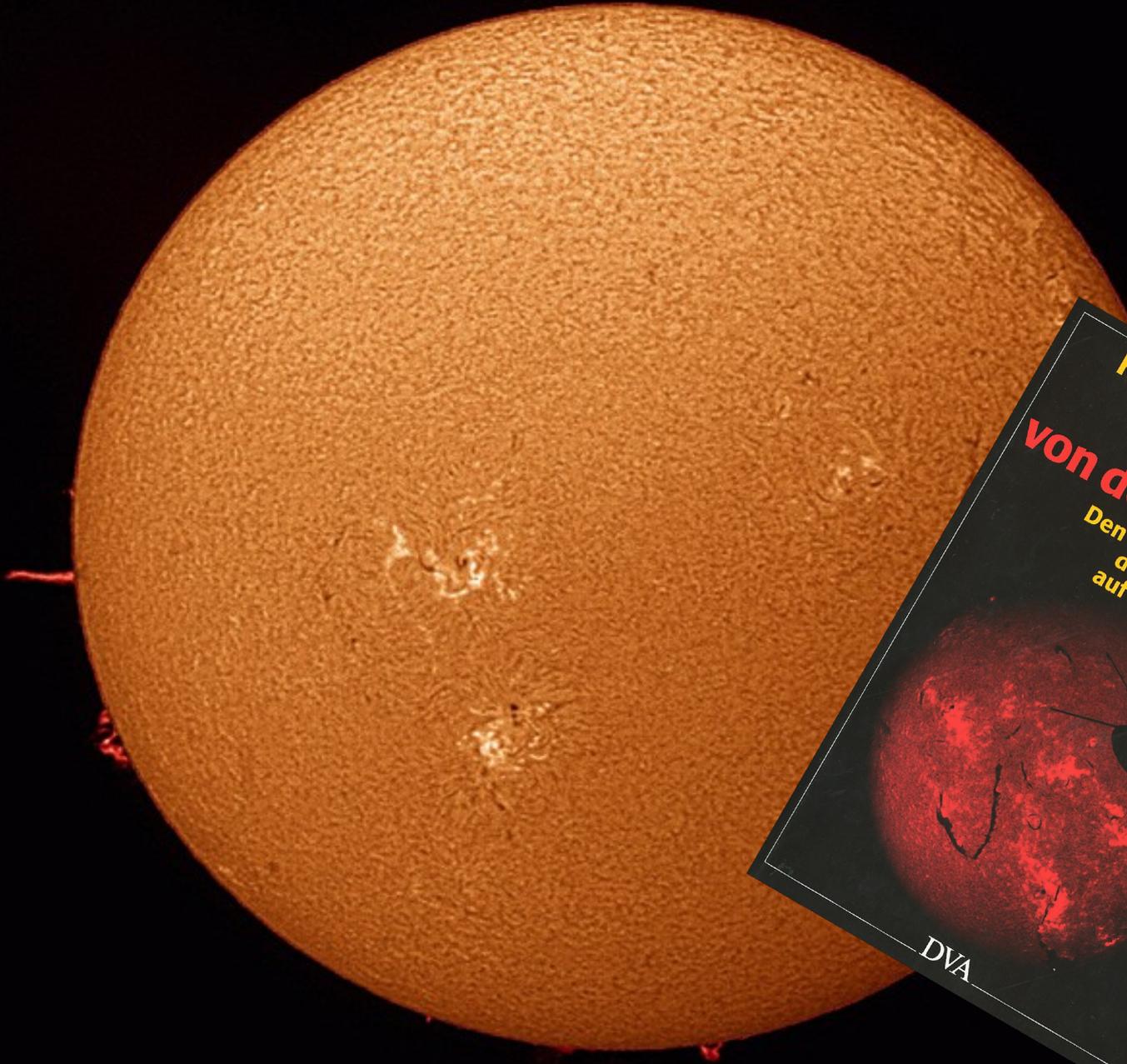


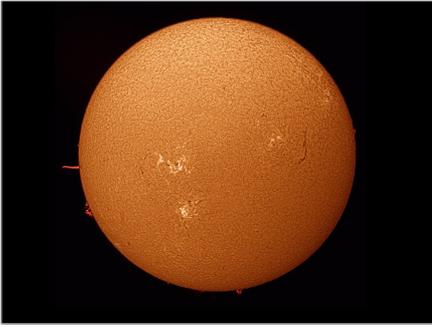












Sonne, Rätselhafter Stern

Plasma & Sonnenflecken

Matthias Wolf

gehalten im Rahmen des
Astro-Treff des WAA am 5.2.2007

Das Werk unterliegt der GFDL – Details siehe letzte Seite

Anm.: fett gedruckte Wörter geben den Zeitpunkt an, zu dem in der Präsentation die Leertaste gedrückt werden sollte, um die nächste Animation zu starten – sonst wurde Fettdruck nicht benützt.



Meine Damen und Herren: „Wir alle tragen die Sonne in unseren Herzen“.

Diejenigen unter Ihnen, die auf der Exkursion in Prag mit waren, wissen, dass das nicht von mir ist. Das waren die Worte jenes alten, namenlosen Professors, der im Sonneninstitut der Sternwarte Ondrejov am Gang einen Vortrag über die Sonne für uns extemporierte.

Gestatten Sie mir zu diesem wohl schönsten Satz, mit dem ein Referat über die Sonne beginnen könnte, ein paar weiter führende Gedanken – auch, wenn es heute hauptsächlich um Sonnenplasma und seine Eigenschaften gehen wird – wie könnte der Herr Professor das gemeint haben?

Vielleicht hat er von der Materie gesprochen, die wir in unseren Herzen tragen.

Der menschliche Körper besteht bekanntlich zu 7/10 aus Wasser. 2/3 aller Atome dieser 70% Wasser sind Wasserstoffatome. Macht – nach einer nicht ganz zulässigen Milchmädchenrechnung – unter dem Strich 14/30, also fast die Hälfte aller Atome, die den menschlichen Körper bilden (deswegen funktionieren ja auch Kernspintomographen so gut, die wir jetzt übrigens „Magnetresonanztomographen“ nennen, weil nach der Energiediskussion der 80er & 90er kein anständiger Mensch mehr etwas mit Atomkernen zu tun haben will).

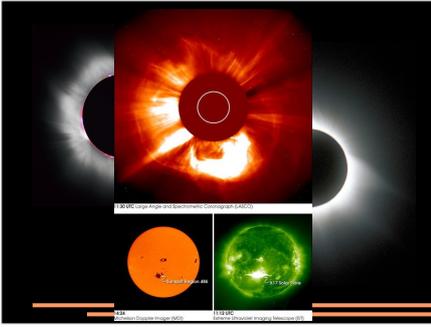
Die kommen aber gar nicht aus unserer Sonne, denn sie entstanden knapp nach dem Urknall als eine seiner „Spätfolgen“. Sie konnten also nicht gemeint gewesen sein. Im Gegenteil, die Sonne rückt ihren Wasserstoffvorrat nicht heraus, sondern benützt ihn zum Erzeugen von Energie (was sie allerdings – zum Glück – zu langsam tut, wie wir vielleicht bei anderer Gelegenheit noch hören werden). **Dabei** vernachlässige ich natürlich die Spuren, die es in Form von Sonnenwinden doch schaffen sich von der Sonne zu lösen, um sich dann am irdischen Nachthimmel als Aurorae borealis und australis bewundern lassen. Und nicht nur dort.

Den Wasserstoff hat er also nicht gemeint. Hat er dann vielleicht von der anderen Hälfte unserer Atome gesprochen, also den anderen Elementen? Nein, auch das ist nicht möglich.

Die Atome der anderen Elemente, die allesamt schwerer sind als Wasserstoff, stammen nämlich bis auf den Großteil des Heliums nicht aus dem Urknall. Sie werden erst im Inneren von Sternen, spätestens bei deren gewaltsamen Ende, „gebacken“. Da unsere Sonne noch scheint, können sie also von dort nicht kommen.

Dabei sei nebenbei erwähnt: Aus dieser Tatsache lässt sich schließen, dass unser Zentralgestirn kein Stern der ersten Generation sein kann. Vielmehr muss sich die Akkretionsscheibe der Sonne aus Überresten von in der Nähe untergegangenen Nachbarsternen gebildet haben. Denn das häufigste Element auf unserem Planeten ist bei weitem Eisen, gefolgt von Sauerstoff und Silizium, keineswegs Wasserstoff oder Helium (und das trotz den ungeheuren Mengen an Wasser, das wir an der Planetenoberfläche finden!) Das ist an sich schon bemerkenswert, bedenkt man, dass von 1000 Atomen im Universum nur ein einziges *nicht* Wasserstoff oder Helium ist!

Wovon kann der Herr Professor also gesprochen haben, wenn er nicht von den Wasserstoffatomen, und schon gar nicht von den anderen gesprochen hat? Er hat die Energie gemeint, die in unseren Herzen umgewandelt und in Pumpbewegungen umgesetzt wird. Energie kann ja bekanntlich nicht erzeugt und nicht vernichtet werden, sondern nur von einer Erscheinungsform in eine andere umgewandelt. Folglich ist jede Energie„erzeugung“ in Wahrheit eine Energieumwandlung und muss von einer anderen Quelle gespeist werden. Diese andere Quelle ist letztendlich immer die Sonne, die mit ihren ungeheuren Vorräten die Erde mit einer Energie von 1,368 KW/m² an Strahlungsenergie versorgt (wovon allerdings ca 1/3 gleich wieder reflektiert wird). Satt 99,98% sämtlicher energetischen Vorgänge auf der Erde sind nichts anderes als die Umwandlung eingefangener Sonnenenergie. Und das, obwohl Sonnenkraftwerke nur einen verschwindend kleinen Teil unserer Energieerzeugung ausmachen. Denn auch das Verbrennen von Holz, Gas, Öl und Kohle genau so wie der Einsatz von Wind~, Lauf~ und Staukraftwerken wandeln lediglich Sonnenergie in für uns nutzbare Varianten um. Und auch, wenn die Energie der fossilen Brennstoffe bereits vor Äonen eingefangen wurde: es handelt sich nach wie vor um Sonnenenergie. Sogar die Gezeiten sind zu 1/3 durch die Sonne mitbestimmt – wenn auch etwas weniger sichtbar: durch ihre Gravitation. Lediglich verschwindende Anteile an Geothermie, Kernspaltungs~ & Fusionsenergie lassen sich nicht auf die Sonne zurück führen.



Werfen wir also einen Blick auf unsere Sonne – was sehen wir da?

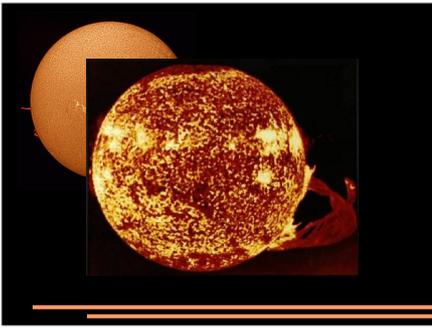
Ohne spezielle Hilfsmittel gar nicht – bzw. nur während totalen Finsternissen – sehen wir die „**Korona**“, ein viele Mio. km, oft mehrere Sonnendurchmesser, ins All hinaus reichender Materiehalo um die Sonne. Die Korona hat eine Temperatur von 1 bis 2 Mio K, wenn auch bei extrem niedriger Dichte (für Zahlenfanatiker: 10^{-19}g/cm^3 , Wasser hat zum Vergleich 1g/cm^3 . Während 1g Wasser also einen Würfel mit 1cm Kantenlänge füllt, braucht 1g Koronamaterie einen mit 20km Seitenlänge dafür). Im Grunde ist die Temperatur nur noch aus der mittleren Teilchenbewegung errechenbar, aber nicht messbar. Thermodynamisch ist es eigentlich eine Unmöglichkeit, dass eine heiße Schale (die Korona) auf Dauer einen kühleren Kern (die Sonne) umgibt, und immer noch wird geforscht, ob die Aufheizung durch Strahlung, eine Art Schallwellen oder sonstigen – z.B. magnetischen – Wechselwirkungen erfolgt.

Im Bild sehen wir links die Korona der Sonnenfinsternis vom 11.8.1999, also kurz vor dem Fleckenmaximum. Beachten Sie, wie die Strahlen praktisch gleichmäßig in alle Richtungen zeigen.

Rechts ist die Korona von der Finsternis vom 29.3. vorigen Jahres, also knapp vor dem Minimum zu sehen: deutlich laufen ihre Strahlen praktisch nur noch in der Äquatorebene.

Ohne richtiger Filterung nicht zu sehen, eigentlich nur im Infraroten strahlend, ist die darunter befindliche „**Chromosphäre**“. Bis in etwa 10.000km Höhe reichend besteht sie vorwiegend aus Wasserstoff und Helium. Von unten nach oben steigt dabei die Temperatur von ca. 6000 auf 10000K an, wobei die Dichte von 10^{-11} auf 10^{-15}g/cm^3 sinkt, bevor sie dann in wenigen 100km in die Korona übergeht. Im linken Bild erkennen wie die Chromosphäre als den rötlichen, fransigen Rand – mehr ist nicht zu sehen.

In der **Chromosphäre** treten immer wieder starke Helligkeitsausbrüche, „**Flares**“ oder auch „**Eruptionen**“ genannt, auf, die oft an die Regionen starker Fleckenaktivität gebunden sind, wie wir auf den beiden unteren Aufnahmen gut erkennen.

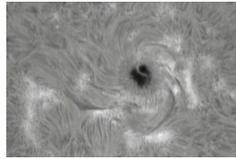
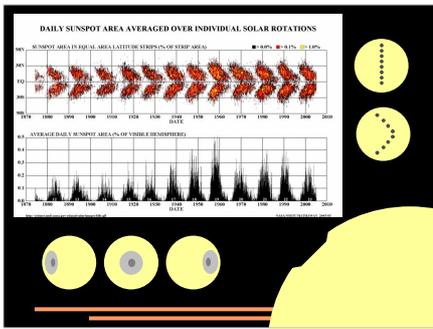


Am auffallendsten – und alles andere überstrahlend – ist wohl die Photosphäre, also jene Ober-„fläche“ der Sonne, die ihr ihr Aussehen verleiht, und die gar keine Fläche ist: es sieht nur auf Grund der gewaltigen Distanz von 150 Mio. km so aus, denn die Photosphäre hat eine Stärke von etwa 400km bei – Achtung! Zahl – einer Dichte von 10^{-7} g/cm³. Sie ist das, was wir im landläufigen Sinne laienhaft als „die Sonne“ bezeichnen würden.

Auf dieser Oberfläche erkennen wir bei hoher Auflösung, dass sie vollkommen von Granulen überzogen ist, also körnig erscheint – wir haben das bereits eingangs gesehen. Es handelt sich dabei um Konvektionszellen, wie wir sie aus großen Kochtöpfen kennen, knapp bevor Wasser zu sieden beginnt. Der Unterschied ist nur, dass diese hier typischerweise einen Durchmesser von ca. 1000 – 1500 km haben, der Wasserstoff bei etwa 6000K mit ca. 1km/sek. (also 3-facher Schallgeschwindigkeit!) und bei einem Temperaturunterschied von etwa 500K auf- und absteigt. Im Gegensatz zu den magnetischen Sonnenflecken handelt es sich bei der Granulation um ein rein thermisches Phänomen.

Wie dunkle Würmer ziehen sich Filamente über die Photosphäre, die erst am **Sonnenrand** ihre wahre Gestalt offenbaren: Gasmassen, die – vergleichsweise flach wie Blätter – senkrecht über der Oberfläche schweben und sich an Magnetfeldlinien schmiegend majestätische Bögen bilden. Auf diese Weise erkennbar werden sie auch „Protuberanzen“ genannt und sind recht langlebige Gebilde: manchmal überdauern sie auch mehrere Rotationsperioden. Was auf dem linken Bild so aussieht wie ein gewaltiger Blitzeinschlag ist übrigens eine Protuberanz, auf deren Kante wir blicken.

Protuberanzen, wie diese hier, können 10000e km weit ins All reichen und mehrere 100000km lang werden. Manchmal werden sie von darunter statt findenden Flares (chromosphärische Eruptionen, s.o.) fort geblasen. Die Wasserstoffionen können so auch das Magnetfeld der Erde erreichen, von diesem in die Atmosphäre gelenkt werden und dort die herrlichen Polarlichter hervorrufen.



Immer wieder ist die Photosphäre von Sonnenflecken unterbrochen. Wir erkennen die Zone des eigentlichen, dunklen Schatten, die „Umbra“ und ein diese umgebendes, nicht ganz so dunkles, ringförmiges Gebiet, die „Penumbra“. Helle Streifen ziehen sich vom äußeren Rand der Penumbrae zu den Umbrae hinein, die ihrerseits kaum unterbrochen erscheinen.

Den Sonnenflecken liegen übrigens keinerlei chemische Phänomene zu Grunde – sie bestehen aus demselben Wasserstoff, der den Rest der ganzen Sonnenoberfläche ausmacht: Lediglich die an diesen Stellen etwas niedrigere Temperatur lässt einen Fleck hervortreten.

Auffällig ist in diesem Zusammenhang das „**Wilson-Phänomen**“, wir erkennen es sehr gut an dieser Kreuzung aus Augapfel und Todesstern: Je näher ein Fleck dem Sonnenrand steht, desto schmaler ist der der Sonnenmitte zu gewandte Teil der Penumbra. Der **Grund** dafür besteht darin, dass die Umbra etwas eingesunken ist: perspektivische Verkürzung also gesehen in 150Mio. km Entfernung!

Die Intensität der Sonnenflecken unterliegt einem oberflächlich betrachtet ca. 11-jährigen Zyklus (nach seinem Entdecker Heinrich Schwabe der „Schwabe-Zyklus“, in Wahrheit 22-jährig, „Hale-Zyklus“). Trägt man auf einer Zeitachse die **Breiten** ein, an denen Sonnenflecken auftraten, so erhält man über Jahrzehnte hinweg das so genannte „Schmetterlingsdiagramm“, aus dem sich diese Zyklen sehr schön ersehen lassen.

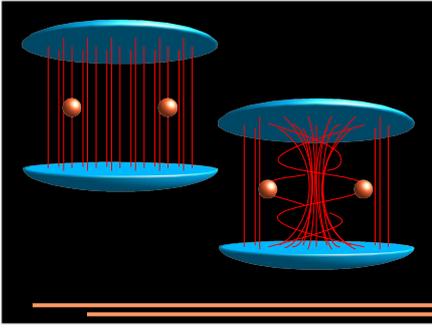
Was ist nun der Unterschied zwischen Schwabe-Zyklus und Hale-Zyklus? Optisch (ohne Hilfsmittel) nicht erkennbar ist, dass Sonnenfleckenpaare aus jeweils einem vorauslaufenden magnetischen Nordpol und einem nachlaufenden magnetischen Südpol bestehen. Auf der jeweils anderen Hemisphäre ist das genau umgekehrt, sodass ich mit meiner Textierung niemals falsch liegen kann. Neigt sich ein 11-jähriger Schwabe – Zyklus seinem Ende zu, so dreht sich die Polarisierung der Sonnenfleckenpaare um, weil das gesamte Magnetfeld der Sonne zusammenbricht und sich umpolt. Das erklärt auch, wieso Maximums- und Minimumskoronae so unterschiedlich aussehen.

Sonnenflecken werfen übrigens das gleiche Problem auf wie die heiße Korona um die kalte Sonne: woher kommt aus einer heißen Sonne, die schlappe 5000 Mio Jahre Zeit hatte, ihre Temperatur auszugleichen, auf einmal ein kühler Fleck?

Die Sonnenflecken sind es auch die uns zeigen, dass sich die Sonne am Äquator einmal in rund 25 Tagen um ihre Achse dreht – und zwar von West nach Ost. Das ist kein Zufall, denn Westen und Osten sind schlichtweg so definiert: Osten hat ein Körper dort, *wohin er* sich dreht (und Norden ist dabei der Pol, um den der Körper sich nach links dreht – Magnetismus hat damit rein gar nichts zu tun, sondern ist auf der magnetischen Erde bloß ein praktisches Hilfsmittel zur Richtungsbestimmung). Ebenfalls kein Zufall ist es, dass sich die Sonne in derselben Richtung dreht, in der die Erde sie umläuft – schließlich entstanden beide aus ein und der selben Akkretionsscheibe.

Und noch **etwas Interessantes** offenbart die Beobachtung von Sonnenflecken: am Äquator dreht sich die Sonne schneller, als an ihren Polen: Könnten wir zu einem Zeitpunkt eine senkrechte, gerade Reihe von Sonnenflecken sehen, gleichmäßig verteilt von Pol zu Pol, und würden 27 Tage später wieder beobachten, so wäre die Reihe (nach 1 Umdrehung des Sonnenkörpers) nicht mehr gerade, sondern hätte einen nach Osten gewölbten Bauch. Wir nennen diesen Effekt „Differenzielle Rotation“, und haben ihn immer noch nicht in allen Details verstanden – obwohl wir wissen, dass es sich hier um ein „Drehmomentsortierungsphänomen“ handelt.

Interessanterweise haben wir damit die Schlüssel zur Beantwortung aller oben aufgeworfenen Fragen, auch wenn die Sonnenforschung Jahrzehnte gebraucht hat, um die einzelnen Steinchen zu einem erkennbaren Mosaik zusammenzufügen.



Dazu müssen wir das Material, aus dem die Sonne besteht, etwas genauer untersuchen. Es handelt sich bekanntlich um „Plasma“, diesen etwas ominösen „4. Aggregatzustand“, „entartete Materie“. (Allerdings befinden sich mehr als 99 % aller sichtbaren Materie im Universum in diesem Zustand. Da erscheint er keineswegs mehr so entartet. Im Gegenteil: Wir sind es, die aus entarteter Materie bestehen!).

Dieser Zustand tritt ein, wenn die thermische Energie, die ja letztlich nichts anderes ist, als heftige Molekülbewegungen, so stark wird, dass Atomkerne „ihre“ Elektronen nicht mehr an sich binden können. Es entsteht – bei allen Vorbehalten gegen

diese Formulierung – eine Art „Flüssigkeit“, in der Kerne und Elektronen einfach herumschwirren, ohne eine feste Ordnung zu bilden, wie das bei Flüssigkeiten und Gasen, geschweige denn bei kristallinen Strukturen der Fall ist.

Verblüffender Weise geht damit eine drastische Änderung der magnetischen Eigenschaften einher, die ein Stoff aufweist. Und die sind bei allen Plasmen gleich, egal, aus welcher „Grundmaterie“ sie entstanden sind:

Plasma ist nicht fähig, sich von einem Magnetfeld durchdringen zu lassen, noch, es entweichen zu lassen.

Was bedeutet das? Dazu ein kleines Gedankenexperiment: Vom verrückten Professor – ist er heute Abend eigentlich hier? - leihen wir „Plasmatilin“. Das sieht aus wie normales Plastilin, das wir aber mit einem Fingerschnipp dazu bringen können, die Eigenschaften von Plasma anzunehmen. Nehmen wir außerdem an, dass uns jeweils geeignete Magnetfelder zur Verfügung stünden, denn ohne Magnetfelder werden Plasmaexperimente eher langweilig: es benimmt sich überhaupt nicht anders wie andere Materie auch (abgesehen davon, dass es ein paar Millionen Grad hat - aber für unsere Gedankenexperimente benutzen wir „kaltes Plasma“, das bereits bei Zimmertemperatur plasmatisch ist – eben indem wir mit den Fingern schnippen). Das alles haben wir uns natürlich gerade ausgedacht! Aber wir brauchen es, um die magnetischen Eigenschaften des Plasma anschaulich zu machen.

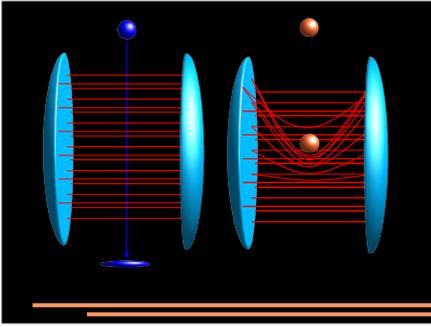
Mit **Elektromagneten** können wir ein Feld erzeugen. Das ist zwar an sich unsichtbar, aber wo wir schon Plasmatilin haben, das es nicht gibt, haben wir halt auch ein **sichtbares** Magnetfeld.

Nun formen wir zwei **Kügelchen** aus dem Plastilin, legen sie auf einen Teller, der sich in einem gleichmäßigen, senkrechten Magnetfeld befindet und drehen ihn, dann passiert: nichts.

Schnippen wir aber mit den Fingern, und verwandeln damit die Kügelchen in „Plasmatilin“, so werden wir sehen, wie die sie auf einmal beginnen, die Feldlinien des Magnetfeldes „**mitzunehmen**“ und das Magnetfeld also „aufwickeln“, wenn wir den Teller drehen. Die Feldlinien zwischen den Kügelchen werden zu einem starken Strang zusammen gedrängt, von denen umwickelt, die genau durch die Kügelchen gehen, und die Äußeren werden „ausgedünnt“. (Der Professor erklärt uns dabei, dass die Anzahl der Feldlinien pro Flächeneinheit, also ihre Dichte, dabei das Maß für die Stärke des magnetischen Fluss ist.)

Wir halten den Teller an und drehen ihn zurück. Dabei beobachten wir genau den umgekehrten Effekt: Die Feldlinien des Magnetfeldes wickeln sich wieder ab, und wenn wir die gleiche Anzahl Umdrehungen ausgeführt haben wie beim „Einwickeln“, ist der Ausgangszustand wieder hergestellt: zwei Plasmatilinkügelchen auf einem Teller liegen in einem gleichmäßigen, senkrechten Magnetfeld.

Wir schnippen mit den Fingern und haben wieder normales Plastilin.



Was ist da passiert? Wie bereits erwähnt, lässt Plasma keine Änderung seines eigenen, inneren Magnetfeldes zu – die Feldlinien im Innern des Plasma sind „eingefroren“ (Warum das so ist, überlegen wir uns gleich). Das Feld als ganzes reißt aber nicht einfach ab, wenn die Kugelchen sich bewegen, sondern wird mitgenommen. Die Feldlinien bemühen sich dabei, sich so gleichmäßig wie möglich zu verteilen und möglichst großen Abstand zu einander einzuhalten (ganz so, als ob sie einander nicht leiden könnten), und werden jede Überkreuzung vermeiden. Was bleibt dem Magnetfeld da übrig, als sich von den Kugelchen aufwickeln zu lassen?

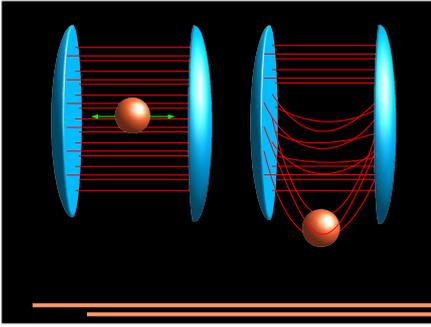
Der Grund dafür besteht darin, dass Plasma auf Grund seiner freien Elektronen ein sehr guter Leiter ist (aber keineswegs supraleitend!). Magnetfeldänderungen induzieren Spannungen und damit Ströme, Ströme wiederum induzieren aber Magnetfelder. Und nun kommt der verblüffende Effekt: Jede Änderung eines Magnetfeldes, in dem sich Plasma befindet, induziert in diesem Plasma Ströme, welche den Änderungen des Magnetfeldes ganz genau entgegen wirken: Das Magnetfeld im Plasma bleibt unverändert – es wirkt wie eingefroren. Eine Bewegung durch ein Magnetfeld, die Feldlinien schneidet, ist in diesem Zusammenhang genau das Gleiche.

Wir machen noch ein paar weitere **Experimente**. Diesmal bedienen bauen wir einen Apparat mit waagrechten Feldlinien. Wir verstecken ein Kugelchen hinter dem Rücken und schnippen mit den Fingern - das andere besteht jetzt wieder aus Plasmatin.

Jetzt lassen wir sie von oben auf unser Magnetfeld fallen. Das Plastilinkugelchen (hier blau) macht pünktlich und exakt das, was man von einem Plastilinkugelchen erwarten würde: Es **fällt** durch das Magnetfeld durch und zerplatzt auf der Arbeitsplatte. Das andere aber, das aus Plasmatin, fällt keineswegs einfach durch wie sein Geschwisterchen, sondern wird vom Magnetfeld, dessen **Feldlinien** unter seiner Last verdichtet werden, elegant aufgefangen, sodass es nun ganz ruhig auf dem Magnetfeld ruhend schwebt.

Weil fair aber fair bleiben muss, schnippen wir nochmals, und sofort platscht auch dieses Kugelchen auf die Arbeitsplatte neben seine Schwester, die noch so benommen ist, dass sie vergisst, durch unser 2. Schnippen zu Plasmatin zu werden: wir haben wieder 2 Plastilinkugelchen.

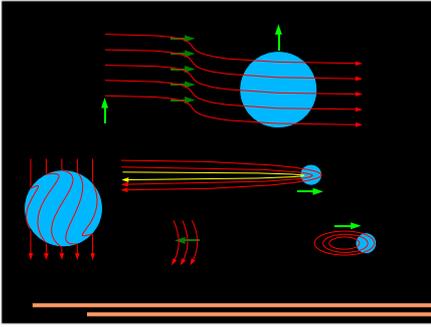
Was ist passiert: Im Grunde genau das Gleiche wie beim ersten Experiment der „aufgewickelten Feldlinien“: Das Plasma hat eine Änderung seines inneren Magnetfeldes verhindert. Da war vorher keines, also durfte auch keines hinein. Es hat das Magnetfeld unter seiner Last komprimiert, konnte es aber nicht durchqueren.



Wir vereinen die Kügelchen zu einem Klumpen, halten ihn in die Mitte des **Magnetfeldes**, und „Schnipp“ - Plasmatilin.

Noch haben wir den Klumpen in der Hand, und dabei machen wir nebenbei auch eine interessante Feststellung: Wenn wir (in dem immer noch waagrechten Feld) mit dem Klumpen hin und her fahren, spüren wir nicht den geringsten Widerstand! Das Plasmatilin *entlang* der Feldlinien zu bewegen will also allem Anschein nach keinerlei Änderung des inneren Magnetfeldes herbei führen, denn sonst könnten wir es nur unter Kraftaufwand tun. Nur gegen das Schneiden von Feldlinien hat Plasma etwas einzuwenden!

Wir **lassen** aus, und was nun kommt, erwarten wir beinahe schon: Der Plasmatilinklumpen stürzt in Richtung Arbeitsplatte, wird aber langsamer, und von den sich ausdehnenden Feldlinien aufgefangen – er fällt nicht herunter, sondern kommt wieder irgendwo in einem Gleichgewichtszustand zur Schweben. Die Feldlinien, die den Klumpen ja durchdringen, wirken wie Gummibänder.

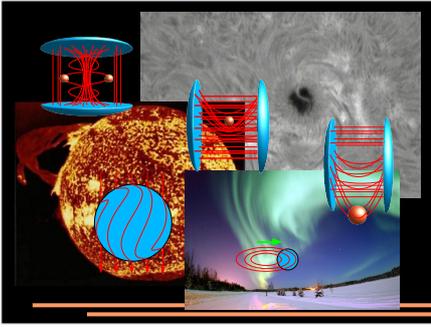


Das nächste Experiment „passiert“ mir ganz unbeabsichtigt: Während ich den Plasmatilinklumpen noch in der Hand habe, **stoße** ich an einen Elektromagnet und verschiebe ihn. Ich spüre den Ruck deutlich im Klumpen! Ich wiederhole es, und es besteht kein Zweifel: So, wie Plasma Feldlinien „mitnimmt“, nehmen auch Felder Plasma „mit“: Es wird eine Kraft ausgeübt.

Haben wir denn keine **Chance**, den Plasmatilinklumpen aus dem Magnetfeld zu befreien, ohne zu Schnippen? Doch, wir müssen nur zu einem Trick greifen: Wir nehmen also den Klumpen, und beginnen, ihn um seine **Achse** zu drehen. Dazu müssen wir anfangs einen gehörigen Widerstand überwinden, aber dann geht es leichter und leichter, und nach einiger Zeit können wir ihn aus dem Magnetfeld nehmen, als ob er nie drin gewesen wäre.

Wie kommt das? Beim Drehen nimmt der Plasmatilinklumpen seine inneren Feldlinien mit. Die beginnen also sich „aufzuwickeln“. Es entstehen dabei „Schlaufen“, in denen Linien neben anderen, genau in entgegengesetzte Richtung zeigende, zu liegen kommen: die beiden Feldlinien löschen einander aus – das Magnetfeld verschwindet! Das bedeutet übrigens auch, dass ich den Klumpen sehr wohl aus dem Feld hätte reißen können: **Hätte** ich ihn unter Kraftaufwand nur weit genug von der Apparatur entfernt, so wären einander entgegenlaufende Feldlinien nah genug an einander geraten, um sich gegenseitig auszulöschen. Der **Klumpen** hätte sich mit einem eigenen Magnetfeld verselbständigt.

Alle hier beschriebenen Experimente können wir im Übrigen ganz ohne Gedankenexperiment an der Sonne beobachten!



Wir fassen zusammen, wobei wir die Ergebnisse unserer Experimente auf die Sonne projizieren wollen:

Experiment 1: Die Feldlinien wickelten sich auf, als wir die Plasmatilinkugeln auf dem Teller drehten.

Der gleiche Effekt ergibt sich dadurch, dass die Sonne ihr eigenes Magnetfeld und Plasma bedingt durch ihre differentielle Eigenrotation aufwickelt. Dabei entstehen magnetisch immer dichtere Stränge, die an manchen Stellen die Oberfläche der Sonne sogar durchdringen und dabei abreißen können, worauf wir gleich zurück kommen.

Experimente 2 & 3 haben uns gezeigt, dass Plasma magnetische Feldlinien nicht schneiden kann: es kann in ein Magnetfeld weder eindringen (das Feld wird dabei verdrängt), noch kann ein Magnetfeld in Plasma eindringen. Entlang der Feldlinien kann Plasma sich allerdings frei bewegen.

Dadurch können die Plasmastränge also abreißen – indem das Plasma sich entlang der Feldlinien in die eine und die in die andere Richtung schiebt. Es reißt dabei nicht das Magnetfeld ab, die Feldlinien sind intakt! **Entlang** der Feldlinien kann heiße Materie entweichen – es bleibt mit einer ganz ähnlichen Begründung wie „Verdunstungskälte“ eine kühlere Zone auf der Oberfläche zurück. Wir sehen – richtig: 2 Sonnenflecken. Einen vorauslaufenden und einen nacheilenden. Diese sind magnetisch immer umgekehrt gepolt, wobei die Polung während des gesamten Fleckenzklus immer die gleiche ist. (Und auch die Basis für Protuberanzen haben wir bereits geschaffen)

Experiment 4: Plasma kann das Magnetfeld nicht verlassen, noch kann ein Magnetfeld Plasma verlassen.

Das sehen wir an **Protuberanzen**, die oftmals wunderschöne, 100000e von Kilometern ins All reichende Bögen bilden, die das lokale Magnetfeld zwischen Flecken und Fleckengruppen sichtbar machen.

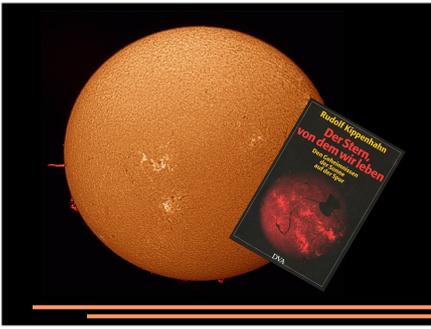
Experiment 5: Laterale Verschiebungen der Magnetfeldlinien üben eine Kraft auf darin befindliches Plasma aus. Wir sprechen von so genannten Alfvén – Wellen.

Bewegtes Plasma – und damit bewegte Feldlinien – haben wir auf der Sonnenoberfläche im Überfluss: Durch Granulen und Supergranulenbildung werden Magnetfelder lokal verdichtet aber auch ausgedünnt, und wir beobachten, wie Alfvén-Wellen über die Oberfläche laufen.

Experiment 6: entgegengesetzt orientierte Magnetfelder in einem Plasma löschen einander aus – Plasma hat eine so genannte „Abklingzeit“. Das ermöglicht es den **Flares**, eine Protuberanz aus dem Magnetfeld der Sonne zu reißen und als Sonnenwind fort zu blasen.

Und nun zum Fleckenzklus: Wird die Aufwicklung der Sonne so stark, dass entgegengesetzt orientierte Magnetfeldlinien nah beieinander zu liegen kommen, so löschen diese einander aus. Das passiert, wenn die Plasmastränge an der Oberfläche im Verlauf eines Zyklus bedingt durch die differentielle Rotation immer dichter und dichter nebeneinander zu liegen kommen. Irgendwann ist der Zeitpunkt erreicht, da beginnen die Magnetfelder der einzelnen Stränge einander zu annihilieren. Die Fleckenaktivität der Sonne verlöscht, und ein neuer Zyklus beginnt – allerdings hat die Sonne ihr Magnetfeld umgepolt, und die vorauslaufenden Flecken sind jetzt andere Pole, als sie elf Jahre lang waren.

Warum das Magnetfeld insgesamt umgepolt wird, dafür haben wir bis heute noch keine schlüssige Theorie – allerdings brauchbare Ansätze eines ostdeutschen Astronomen. Sein Modell zeigt, wie die Annihilation der Feldlinien zu Ende des Schwabe-Zyklus ein schwaches, umgepoltes Nord-Süd-Magnetfeld übrig lässt. Die differentielle Rotation beginnt, neue Stränge zu wickeln, der nächste Schwabe-Zyklus ist also initiiert, diesmal mit umgekehrten Polungen der Fleckenpaare.



Das bringt uns ans Ende der Ausführungen über die Sonne.

Ich möchte nicht unerwähnt lassen, dass dieses Referat – besonders die Plasmaexperimente – inspiriert war durch das hervorragende Buch „Sonne – der Stern von dem wir leben“ von Rudolf Kippenhahn, erschienen bei der DVA, 1990, ISBN - 3-421-02755-2.

Seien Sie versichert, dass alles, was hier verkürzt, unvollständig oder gar fehlerhaft dargestellt wurde, offenbar ich selbst nicht kapiert habe – bei Hrn. Kippenhahn können Sie nachlesen, wie die Dinge wirklich liegen.

Danke an Hrn. Günther Eder für die Bereitstellung des Fotos des Tschechischen Professors. Das Titelbild des Buchs ist gescannt, sämtliche Rechte dafür liegen bei der Deutschen Verlagsanstalt. Alle anderen Fotos sowie das Schmetterlingsdiagramm sind aus der Wikipedia und unterliegen der „GFDL – GNU Free Documentation Licence“, die im Wesentlichen besagt, dass alles benützt und auch verändert werden darf, solange man die Quelle angibt, und das eigene Werk, das daraus entsteht, ebenfalls der GFDL unterwirft, was ich hiermit tue.

Details zur GFDL finden sie auf <http://www.gnu.org/licenses/fdl.html>. Es handelt sich um den englischen Originaltext; offizielle Übersetzungen gibt es nicht. Allerdings finden Sie auf <http://www.giese-online.de/gnufdl-de.html> eine gute deutsche Übersetzung.



GNU-Logo der
Free Software
Foundation

techn. Anmerkung: Diese Präsentation wurde mit OpenOffice 2.0 – Impress erstellt. Ich übernehme daher keinerlei Verantwortung für das einwandfreie Funktionieren der Powerpoint-Variante (Animationen werden sicherlich tw. nicht unterstützt bzw. anders aussehen) und empfehle jedermann generell die Benützung von OpenOffice, erhältlich auf der Webseite <http://www.openoffice.org>.