

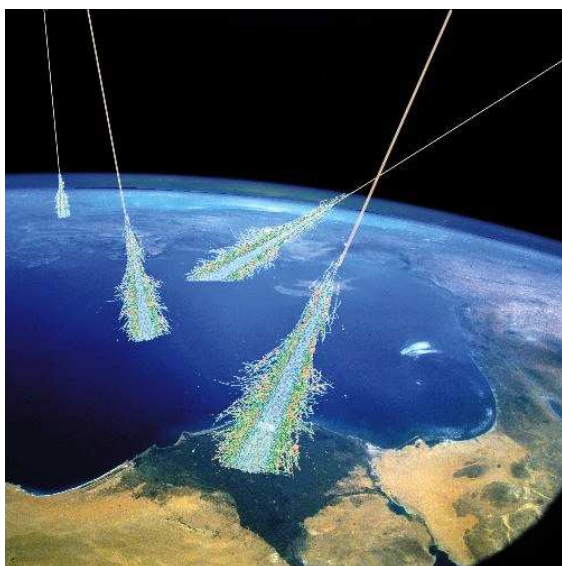
# Universets ekstreme partikler

Af Katrine Facius, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Er du nogensinde blevet ramt af en partikel fra oven? Selvfølgelig er du det! Kosmiske partikler regner ned over Jorden hvert sekund, og fysikere har i årevis kæmpet med at forklare hvor de kom fra og hvorfor nogle af dem synes at have energier der overstiger hvad der er teoretisk muligt. Mange modeller har været foreslået, og nu lader det endelig til at nogle af svarene er inde for rækkevidde.

## Fysik ved ekstreme energier

Jorden bliver konstant bombarderet med partikler, der regner ned over os fra verdensrummet.



**Figur 1.** Byger af energetiske partikler opstår når kosmiske partikler rammer toppen af jordens atmosfære (NASA).

De har været studeret længe i et forsøg på at svare på spørgsmålene: hvad er det for nogle partikler og hvor kommer de fra? Nogle af partiklerne har imidlertid vist sig mere gådefulde end andre: de såkaldte ultra-højenergetiske kosmiske partikler med energier over  $10^{19}$  eV (Ultra High Energy Cosmic Rays, UHECR).

De kosmiske partikler spænder vidt i energi, og for UHECR partiklernes vedkommende er deres energi mere end 1000 gange større end hvad vi kan frembringe i eksperimenter her på Jorden.

Derved giver de os et fremragende laboratorium for at studere fysikken ved de energier, og eventuelt afsløre helt ny fysik.

Men på trods af mange års studier har det været umuligt at frembringe modeller der i tilstrækkelig grad kunne forklare UHECR partiklernes oprindelse, og disse partikler har præsenteret fysikere over hele verden for et fascinerende mysterium.

## Partikler fra fjerne galakser

For at forklare de kosmiske partikler vi har observeret her på Jorden anvender mange modeller såkaldte

“bottom-up” scenarier. Her bliver kendte partikler, som for eksempel protoner, accelereret op til høje energier i astrofysiske objekter og udbreder sig herefter gennem rummet til Jorden.

Vi regner med at langt størstedelen af de kosmiske partikler vi observerer stammer fra vores egen galakse. Men for at partiklerne ikke undslipper vores galakse, skal der være et kraftigt magnetfelt til at fastholde dem. Sådanne magnetfelter findes for eksempel i supernovaer.

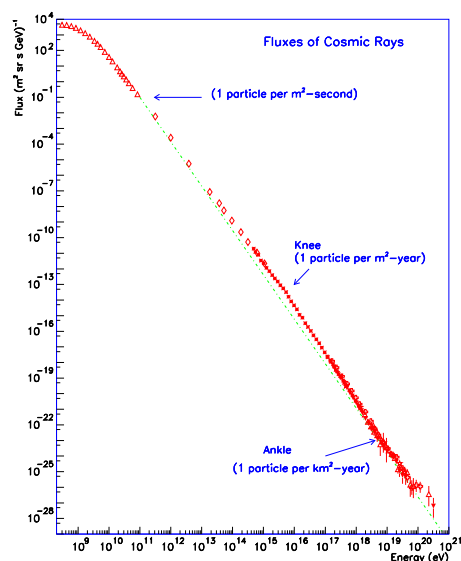
En partikel med energi  $E$  og ladning  $Ze$  vil i et magnetfelt bevæge sig rundt i en cirkelbevægelse med radius  $r$ :

$$r \simeq \frac{E}{ZeB}, \quad (1)$$

hvor  $B$  er magnetfeltets styrke. For at blive fastholdt må denne radius ikke blive større end magnetfeltets radius  $R$ . Dette krav giver et groft estimat på den maksimale kinetiske energi som partikler kan opnå:

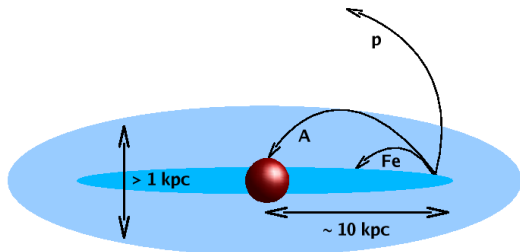
$$E \lesssim ZeBcR \simeq ZR'B' \cdot 10^{18} \text{ eV}. \quad (2)$$

$R'$  er  $R$  regnet i kiloparsec, og  $B'$  betyder magnetfeltet angivet i mikrogauss ( $1 \text{ kpc} = 3,09 \cdot 10^{19} \text{ m}$  og  $1 \mu\text{G} = 10^{-10} \text{ Tesla}$ ).



**Figur 2.** Antallet af kosmiske partikler vi ser her ved Jorden aftager med stigende energi, som  $E^{-\gamma}$ . Den grønne stiplede linie viser potensfunktionen  $E^{-3}$  til sammenligning. For partikler med energier over  $10^{20}$  bliver der i gennemsnit observeret under 1 partikel per kvadratkilometer per år.

Vores galakse er mindre end 1 kpc tyk og magnet-felterne her er i størrelsesordenen nogle få  $\mu G$ . Hvis partiklerne bliver accelereret op til højere energier, vil de ikke længere blive fastholdt og undslipper. Denne sammenhæng betyder også at jo højere energi vi kigger på jo flere af de lettere partikler som protoner vil undslippe, hvorimod de tungere kerner som for eksempel jern stadig vil kunne blive fastholdt, se figur 3.



**Figur 3.** Vores egen galakse er under 1 kpc tyk. Jorden befinder sig cirka 10 kpc fra centrum, og her kan vi blive ramt af kosmiske partikler der holdes fast af magnetfelter i galaksen. Tegningen illustrerer tre partikler ved en given energi, der netop svarer til at et element A, lettere end jern, vil blive fastholdt, hvorimod de lettere protoner undslipper.

For de kosmiske partikler der stammer fra vores egen galakse betyder det at jo højere energier vi betragter, jo mere dominerer de tungere kerner. Dette stemmer overens med observationerne for de kosmiske partikler med energier mellem "knæet",  $E \simeq 10^{15}$  eV, og "anklen",  $E \simeq 10^{18}$  eV.

Men hvad så med partikler, hvis energier er så store, at vores galakse ikke længere kan fastholde nogen af partiklerne? I dette tilfælde må de kosmiske partikler stamme fra ekstra-galaktiske kilder. Dette er de såkaldte UHECR partikler og her begynder det at blive udfordrende at finde gode forklaringer på hvor de kommer fra.

### Universets imponerende accelerators

På Jorden studerer vi fysik ved høje energier ved at accelerere partikler op i partikelacceleratorer. Det bedst kendte eksempel på en sådan er den 27 km lange accelerator-ring der findes på forskningscenteret CERN ved Geneve. Men Universet har nogle meget større accelerators til rådighed!

Vi regner med at accelerationen sker gennem forskellige processer i astrofysiske objekter som for eksempel galaksecentre og supernovaer. En god kandidat til sådan en proces blev udformet af Fermi i 1949 og kaldes Fermiacceleration. I denne model kan partikler opnå høje energier ved at bevæge sig frem og tilbage over en chokbølge-front. For hver krydsning bliver partiklen accelereret yderligere, og den maksimale energi som partiklen kan opnå på denne måde afhænger altså af hvor lang tid den kan vekselvirke med chokbølgen. I nogle tilfælde vil chokbølgens levetid være den begrænsende faktor, som for eksempel for supernova chokbølger, der dør ud efter cirka 1000 år. Men hvis denne chokbølge eksisterer i meget længere tid, vil den maksimale energi i stedet være begrænset af sandsynligheden for, at partiklen undslipper når den når op på tilstrækkelig høj energi.

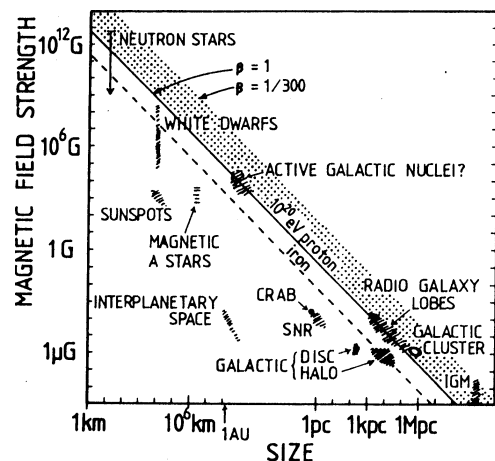
I en simpel modellering af Fermiacceleration i chokbølger har man vist at den maksimale energi en partikel med ladning  $Ze$  kan opnå er givet ved

$$E \simeq (\beta c) Z B' R' \cdot 10^{18} \text{ eV} \quad (3)$$

Her angiver  $\beta c$  hastigheden af chokbølgen. For supernovaer vil  $\beta \sim 0,01$ , men under særlige betingelser kan  $\beta$  nå op omkring 1. Denne ligning udtrykker groft sagt blot endnu engang at baneradiusen af de accelererede partikler må forblive inden for acceleratoren, lige som i jordiske accelerators!

En af styrkerne ved Fermiacceleration er at energispektret for de accelererede partikler automatisk vil følge en potensfunktion,  $E^{-\gamma}$ . Dette er netop hvad vi observerer for de kosmiske partikler, som figur 2 viser. I tilfælde med stærke chokbølger vil det spektrale index  $\gamma$  være lidt større end 1. Men på partiklernes vej til Jorden mister de energi i forskellige processer, og siden dette energitab er afhængigt af deres energi, vil det observerede spektrum ved Jorden være stejlere. Dette passer glimrende med det observerede spektrum der følger  $E^{-1,1} - E^{-2,1}$ .

I jagten på at finde kandidater til disse ekstra-galaktiske accelerators viser ligning 3 at der er visse krav til både størrelsen af objektet og styrken af dets magnetfelt for at de kan accelerere partikler op til de ekstremt høje energier. I det kendte Hillas-plot i figur 4 er forskellige astrofysiske objekter placeret i henhold til deres størrelse  $R$ , og magnetfelt  $B$ . For at kunne producere UHECR partikler skal de ligge over de rette linier i diagrammet, og mulige kandidater er for eksempel aktive galaksecentre og gammaglimt. Men der er bemærkelsesværdigt få kandidater og desuden er  $10^{20}$  eV tæt på den maksimale energi vi kan opnå i de astrofysiske accelerators. UHECR partiklerne lader altså til at repræsenterer de mest ekstreme energier Universet kan producere.



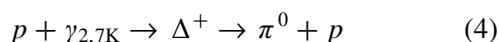
**Figur 4.** Hillas plottet, der viser forskellige astrofysiske objekter i henhold til deres størrelse  $R$  og styrken af deres magnetfelt  $B$ . Objekterne der ligger under de rette linier i diagrammet er ikke i stand til at accelerere partikler op til  $10^{20}$  eV ved Fermiacceleration. Den stiplede linie er for jernkerner, den fuldt optrukne for protoner, begge for chokbølger med  $\beta = 1$ . Den skraverede region er for protoner accelereret i "langsomme" chokbølger med  $\beta$  ned til 1/300.

## Baggrundsstrålingen dræner energien

Efter partiklerne er blevet accelereret op til de høje energier skal de udbrede sig gennem rummet for at nå frem til jorden.

Rummet er fyldt med fotoner fra den kosmiske baggrundsstråling. Mange af partiklerne der bevæger sig gennem rummet vil ikke blive påvirket af disse fotoner, og Universet vil se "transparent" ud. Men for partikler med energier så høje som UHECR partiklerne kan der pludselig foregå processer, som dræner dem for noget af deres energi.

Protoner med energier over  $6 \cdot 10^{19}$  eV kan for eksempel vekselvirke med fotonerne og skabe pioner gennem processen:



I sådan en proces mister protonen en stor del af sin energi. Protonen vil fortsætte med at vekselvirke med fotoner på sin vej, indtil dens energi er under grænsen på  $6 \cdot 10^{19}$  eV, og processen ikke længere kan forekomme.

Den afstand som partiklerne kan nå at bevæge sig inden de har mistet så meget energi at vekselvirkningen med baggrundsstrålingen stopper varierer fra partikel til partikel. For en proton vil denne middelvej være mindre end 50 Mpc. Det svarer til den afstand som lyset bevæger sig på 150 millioner år, og er i kosmiske sammenhænge relativt kort. Til sammenligning er centrum i den galaksehob som Mælkevejen er en del af kun 20 Mpc væk.

UHECR partikler med  $E > 10^{19}$  eV vil altså blive drænet for store dele af deres energi på vejen til Jorden. Kun et fåtal vil nå Jorden med energier over denne grænse, nemlig dem der stammer fra objekter mindre end 50 Mpc væk. Dette førte til at Greisen, Zatsepin og Kuz'min forudsagde, at vi burde se væsentligt færre partikler med energier over  $10^{19}$  eV, i dag kendt som GZK-grænsen.

## Mystiske observationer

Kan disse modeller så forklare hvad det er vi rent faktisk ser? Modellerne stiller visse krav, som vores observationer skal leve op til: først og fremmest må de højenergetiske partikler komme fra ekstra-galaktiske astrofysiske objekter af en vis størrelse og med et vist magnetfelt. Derudover bør vi se et fald i antallet af partikler med energier over  $10^{19}$  eV. Og de partikler vi ser over denne GZK-grænse er nødt til at stamme fra astrofysiske objekter der ikke er mere end 50 Mpc væk!

Disse begrænsninger er årsagen til at de højenergetiske kosmiske partikler har været en gåde for fysikerne i mange år. De meget sparsomme observationer der har været til rådighed har gjort det svært at konkludere hvorvidt de bekræftede modellerne. Og nogle af de observerede partikler syntes tilmed på mystisk vis at modsige forudsigelserne.

Tilbage i starten af 1990'erne blev flere højenergetiske kosmiske partikler observeret af det såkaldte Fly's Eye eksperiment, eller "Flueøje-eksperiment", opkaldt efter detektoren som man

"så" partiklerne med, der lignende et stort flueøje! Forskere herfra viste at det var umuligt at knytte deres observationer af partikler over GZK-grænsen til kendte astrofysiske objekter. I stedet tydede deres uniforme fordeling på, at de kom fra meget fjerne objekter. Mysteriet blev større da AGASA eksperimentet i Japan senere målte et stort antal partikler med energier over GZK-grænsen, i modstrid med det fald i intensitet vi forventer, hvis partiklerne kommer fra objekter længere væk end 50 Mpc.

Disse gådefulde observationer har fået fysikere til at tænke i forskellige alternative modeller. I et forsøg på at slippe uden om problemerne med de nødvendige kraftige astrofysiske accelerators, har såkaldte "top down" scenarier været benyttet. Her har helt nye partikler været foreslået som oprindelse til UHECR partiklerne. Et eksempel er super-massive mørkt-stof partikler, som indgår i visse teorier. Med ekstremt høje masser ville de kunne henfalde til kendte partikler med de høje energier vi observerer.

## Er gåden løst?

For at afsløre om de foreslåede modeller var korrekte eller om der var tale om helt ny fysik var det nødvendigt med flere observationer af disse højenergetiske partikler. De tidligere eksperimenter havde været plaget af problemer med at bestemme energien af partiklerne korrekt, og det var tydeligt at større og mere præcise eksperimenter var nødvendige for at få klare svar.

Dette førte til opbygningen af det store Auger eksperiment i Argentina, og netop i disse dage begynder de første svar at dukke frem fra deres observationer. Og i denne omgang tyder det på at observationerne svarer til de nævnte forudsigelser; GZK-grænsen fremgår af de nye data, og tilsyneladende stemmer ankomstretningen for partiklerne med energier over  $10^{19}$  eV overens med kendte aktive galakser. Fremtidens observationer vil helt sikkert bringe mere præcise beskrivelser af disse hidtil så mystiske partikler og astrofysikken vil være en gåde mindre.

## Litteratur

- [1] Günter Sigl (2001), Ultrahigh-Energy Cosmic Rays: Physics and Astrophysics at Extreme Energies, *Science* (January 5) 2001, Vol **291**, no 5501, pp 73-79.
- [2] Adrian Cho (2007), Universe's Highest-Energy Particles Traced Back to Other Galaxies, *Science* (9 November) 2007, Vol **318**, no 5852, pp 896-897.
- [3] <http://www.auger.org/>; [http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-energy\\_cosmic\\_ray](http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-energy_cosmic_ray)



*Katrine Facius* er kandidat i fysik fra Københavns Universitet. Hun arbejder for tiden som ph.d-studerende i gruppen for eksperimentel partikelfysik ved Niels Bohr Institutet, hvor hun er involveret i forberedelsen af det hidtil største jordiske acceleratoreksperiment LHC på CERN ved Geneve.