

Kosmisk stråling

Steen Hannestad, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Kosmiske partikler med meget høj energi rammer Jorden hele tiden. De højeste energier, der er målt, er over 10^{20} eV, og det har i mange år været et mysterium, hvad kilden til disse partikler er. Under 10^{18} eV kommer partiklerne formentlig fra supernovarester i vores egen galakse, mens partikler med højere energi kommer fra ekstragalaktiske kilder. Nye resultater fra Pierre Auger eksperimentet viser, at partikler med meget høj energi med stor sandsynlighed kommer fra aktive galakser.

Indledning

Det, vi idag kalder kosmisk stråling blev opdaget lige før første verdenskrig. I 1912 sendte den tyske forsker Victor Hess en ballon med måleudstyr op i omkring 5 kilometers højde. Måleudstyret bestod af en lufttæt glasklokke med to elektroder. Mellem elektroderne var der stor spændingsforskel og man kunne derfor registrere ionisering af materialet omkring elektroderne. Det underlige var, at intensiteten af den stråling, der ioniserede måleudstyret steg efterhånden som ballonen kom højere op. Den eneste rimelige forklaring var, at strålingen kom fra rummet, men blev delvist absorberet i Jordens atmosfære. Hess kaldte sin opdagelse for "kosmisk stråling". I begyndelsen havde man ingen idé om, hvad strålingen bestod af, men i 1930'erne blev det påvist, at kosmisk stråling bliver påvirket af Jordens magnetfelt. Man kunne simpelthen måle, at der var forskel på strålingsintensiteten fra øst og fra vest. På det tidspunkt var det endnu ikke muligt at producere partikler med høj energi i accelerators, og kosmisk stråling var derfor det eneste tilgængelige laboratorium for den slags partikler. Positronen, der er elektronens antipartikel, blev opdaget i 1932 af Carl Anderson som en af komponenterne i den kosmiske stråling. I 1937 blev en ny og ukendt elementarpartikel, myonen, opdaget på samme måde.

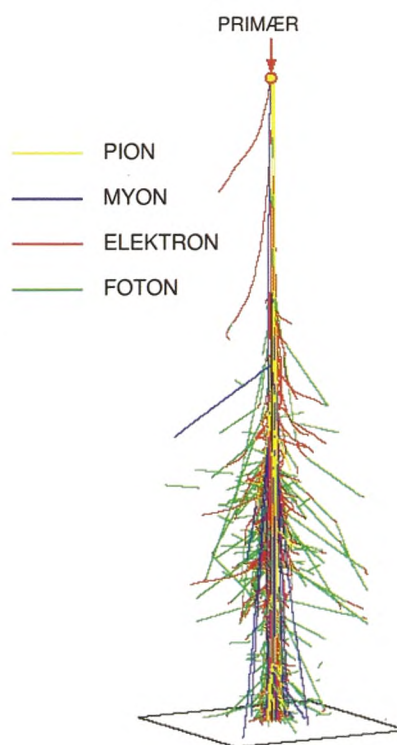
Myonerne har den egenskab, at de uden videre kan trænge gennem Jordens atmosfære, mens stort set alle andre partikler med så høj energi øjeblikkeligt bliver bremset. Spørgsmålet er derfor: Hvad er det egentlig der er årsagen til alle disse myoner? Bliver de udsendt af kilder i rummet, eller bliver de dannet i Jordens atmosfære. Svaret er det sidste. Myoner henfalder med en levetid på kun $2 \cdot 10^{-6}$ sekunder. Hvis de bevæger sig med lyshastighed skulle de altså kun kunne bevæge sig ca. 600 meter inden de henfalder. Det er dog ikke rigtigt. Ifølge Einsteins relativitetsteori ændres målinger af tid og rum når man bevæger sig med hastigheder tæt på lysets. Hvis en partikel bevæger sig med hastigheder tæt på lysets, ændres dens levetid efter formlen

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1)$$

hvor τ er levetiden hvis partiklen ikke bevæger sig. v er partiklens hastighed, og c er lysets hastighed. Hvis f.eks. en myon bevæger sig med 99,9% af lysets

hastighed vil dens levetid være $4,4 \cdot 10^{-5}$ sekunder. Den vil altså kunne bevæge sig omkring 13 kilometer inden den henfalder.

Til gengæld er det også nemt at overbevise sig selv om, at myonerne ikke kan komme fra andre steder i rummet. Hvis f.eks. en myon skal overleve turen fra Solen til Jorden (ca. 150 mio. km.) skal den bevæge sig med 99,999999999999997% af lysets hastighed. For at kunne det, skal den have en energi på ca. $2,5 \cdot 10^{17}$ eV; langt højere end, hvad Solen kan producere. Hvis den skal have overlevet turen fra den nærmeste stjerne skal den have haft en energi på $6,3 \cdot 10^{21}$ eV, en urealistisk høj energi.

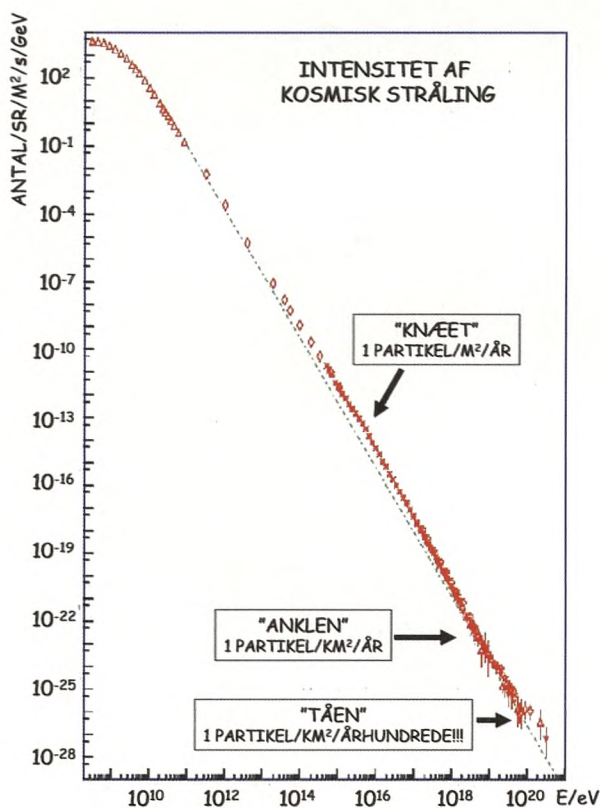


Figur 1. Eksempel på en partikelbyge dannet af kosmisk stråling.

Svaret er derfor, at myonen bliver dannet i Jordens atmosfære på grund af sammenstød mellem andre partikler. Hvis en proton med stor energi rammer en atomkerne i Jordens atmosfære dannes der en byge af nye partikler (eng. Shower). Hvis den oprindelige

partikel har tilpas høj energi kan der dannes tusindvis af sekundære partikler. Langt de fleste af de sekundære partikler er de såkaldte pioner, der meget hurtigt henfalder til myoner, som derefter kan observeres. Figur 1 viser et eksempel på et shower dannet af en proton med en energi på 10^{12} eV.

De oprindelige partikler må nødvendigvis være partikler, der lever meget længere end myoner. Her er der flere mulige kandidater. Den umiddelbart mest oplagte mulighed er fotonen, der har uendeligt lang levetid. En anden mulighed er protoner, men i princippet kan den kosmiske stråling også stamme fra tungere atomkerner som jern. Hvad den kosmiske stråling består af, er i øjeblikket et ubesvaret spørgsmål, specielt ved meget høje energier. Dog har Pierre Auger eksperimentet kunnet sætte en øvre grænse for, hvor stor en procentdel af den kosmiske stråling med høj energi, der kommer i form af fotoner. Grænsen er i øjeblikket ca. 2%, og det er derfor sandsynligt, at det meste af den kosmiske stråling kommer i form af protoner.



Figur 2. Spektret af kosmisk stråling.

Kilder til kosmisk stråling

Et andet oplagt spørgsmål er: Hvad er det, der faktisk danner de partikler, der rammer Jordens atmosfære?

Der er masser af kilder til kosmisk stråling: Vi ved at Solen hele tiden udsender stråling. Til gengæld ved vi også, at Solen ikke kan være årsag til størstedelen af de partikler, der har høj energi. For eksempel kommer strålingen fra mange andre retninger end Solen, og Solens magnetfelt er ikke stærkt nok til at ændre retningen af partikler med så høj energi.

Ved højere energier er der sandsynligvis primært rester af tidligere supernovaer, der forårsager strålingen. Man ved, at mængden af stråling er korreleret med formen af Mælkevejen, og det er derfor umuligt at strålingen kommer fra områder uden for vores egen galakse.

Dette gælder dog kun partikler, der har energier mindre end omkring 10^{17} eV. Ved energier større end dette kan Mælkevejens magnetfelt ikke længere fastholde partiklerne, og langt den største del af strålingen kommer formentlig fra kilder uden for vores galakse. Det kan dog stadig godt være supernova rester, der forårsager en del af strålingen, men det meste kommer sandsynligvis fra kernerne af aktive galakser. Ved endnu højere energier ses der stadig partikler, men væsentligt færre. Spektret af kosmisk stråling kan ses i figur 2. Spektret falder over "knæet" omtrent som E^{-3} . Ved energier i nærheden af 10^{20} eV rammes Jorden kun af omkring 1 partikel per kvadratkilometer per århundrede.

Selv om det lyder af meget lidt, er det dog langt mere end man umiddelbart skulle forvente. Når en proton bevæger sig gennem det interstellare rum kan den vekselvirke med andre partikler. Ved en energi på omkring $4 \cdot 10^{19}$ eV kan en proton vekselvirke med en foton fra den kosmiske baggrundsstråling og producere en partikel, kendt som Δ -partiklen. Tværsnittet for den proces er meget stort og det betyder, at protoner med energi over $4 \cdot 10^{19}$ eV ikke kan bevæge sig længere end ca. 60 mio. lysår før de absorberes. Mærkeligt nok ser man faktisk partikler med energi over denne grænse, der kaldes for Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) grænsen. Den største kendte energi er i øjeblikket ca. $5 \cdot 10^{20}$ eV for en partikel observeret af det amerikanske Fly's Eye observatorium. $5 \cdot 10^{20}$ eV svarer til ca. 80 J eller den kinetiske energi i en tennisbold, der bevæger sig med 220 km/t. Her er energien bare koncentreret i en enkelt partikel.

Der kendes faktisk kun ganske få objekter inden for en afstand på 60 mio. lysår som formentlig er i stand til at producere stråling med så høj energi. Et af dem er den aktive galakse Centaurus A (figur 3).



Figur 3. Den aktive galakse Centaurus A.

Hvordan kommer partikler overhovedet op på så stor en energi? Den mest sandsynlige forklaring er, hvad der kaldes Fermi acceleration. Fænomenet opstår når partikler bevæger sig gennem chokbølger i astrofysiske objekter. På grund af en effekt af den specielle relativitetsteori får en partikel tilført energi hver gang den krydser en chokbølge, og hvis det sker tilpas mange gange kan den faktisk nå op på energier over GZK grænsen. Til gengæld kan partiklen kun krydse chokbølgen et vist antal gange. Når hastigheden bliver tilpas stor kan objektets magnetfelt ikke længere fastholde den, og den forsvinder ud af systemet. Den maksimalt opnåelige energi er derfor bestemt af både objektets størrelse og af styrken af dets magnetfelt. Ud fra denne betragtning er den mest sandsynlige kilde til kosmisk stråling med meget høj energi kernerne af aktive galakser.

Hvordan observeres kosmisk stråling?

Moderne observationer af kosmisk stråling med høj energi foregår ved hjælp af to teknikker. Den første kaldes for "ground arrays". Idéen er at have en række forskellige målestationer ved jordoverfladen, der kan måle de partikler fra bygen, der når så langt. Der er primært tale om myoner, men iblandt pioner og nukleoner. Ud fra information om tid og position for de enkelte partikler kan man rekonstruere bygen og dermed også finde energien og retningen af den oprindelige partikel. Den anden teknik er baseret på, at molekyler i Jordens atmosfære eksiteres når ladede partikler med høj energi passerer. Når bygen af partikler passerer gennem atmosfæren og eksiterer molekyler opstår der flourescens, og man kan bestemme energien af den oprindelige partikel ved at måle mængden af flourescens.

For at få den endelige afklaring på, hvor mange af disse partikler med ekstreme energier, der faktisk er, er man i øjeblikket i gang med opførelsen af et nyt eksperiment, Pierre Auger Observatoriet (PAO) [1], i Argentina. Det er dels meget større end AGASA [2] i Japan og HiRes [3] ved Utah Universitet, dels kombinerer det de to observationsteknikker. På nuværende tidspunkt er PAO næsten færdiggjort, og har allerede publiceret en lang række data. Den første præcisionsmåling af energispektret ved høje energier har bekræftet, at intensiteten falder kraftigt ved energier over $4 \cdot 10^{19}$ eV. PAO bekræfter altså eksistensen af GZK grænsen (i overensstemmelse med HiRES, men i modstrid med AGASA), og det betyder, at kilder i det

nære univers må være ansvarlige for de mest energirige partikler.

Alene denne observation peger som sagt i retning af, at aktive galakser er ansvarlige for produktionen af disse partikler, og at der derfor kun bør ses partikler fra en relativt begrænset mængde af kilder. At dette er tilfældet er netop blevet bekræftet af nye data fra PAO. I det nummer af Science, der udkom 9. november 2007, offentliggjorde PAO nye målinger af 30 partikler med ultrahøj energi. Retningerne hvorfra de kommer, kan næsten alle identificeres med kendte aktive galakser og for eksempel er der mindst to partikler, som kommer direkte fra Centaurus A. På nuværende tidspunkt tyder det altså på, at der er blevet taget et væsentligt skridt i retning af en forståelse af kosmisk stråling med høj energi. Vi ved, at den udsendes af aktive galakser i det nære univers. Der er dog stadig mange brikker i puslespillet, der mangler at blive lagt: Præcis hvad er den fysiske mekanisme, der accelererer partiklerne til disse energier? Hvorfor udsender nogen aktive galakser store mængder kosmisk stråling med høj energi, mens andre kendte aktive galakser tilsyneladende ikke gør? Efterhånden som PAO eksperimentet leverer flere data vil der forhåbentlig komme svar på disse spørgsmål, og dermed også ny forståelse af fysikken i de aktive galakser, der er nogle af de mest ekstreme objekter vi kender til i Universet.

Litteratur

- [1] Pierre Auger Observatoriet, <http://www.auger.org/>
- [2] AGASA – Akeno Giant Air Shower Array, <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>
- [3] HiRes – High Resolution Fly’s Eye Experiment, <http://hires.physics.utah.edu/>



Steen Hannestad arbejder inden for det område, der kaldes astropartikelfysik. Betegnelsen dækker brugen af astrofysiske og kosmologiske observationer til studier af fundamental partikelfysik. Den kosmiske baggrundsstråling er også her blandt de vigtigste informationskilder.