

Prospect of measuring Gerasimova-Zatsepin events using the HiSPARC network

Bas de Gier

27 November 2013

Abstract

An ultra-high energy cosmic ray particle can undergo an interaction with a highly energetic photon from the sun and break into two fragments. These fragments are then deflected by the interplanetary magnetic field and create two extensive air showers which are separated before they penetrate the earth's atmosphere. By measuring the energies of both these showers, it is possible to determine the mass composition of the original disintegrated cosmic ray particle. This method is called the Gerasimova-Zatsepin effect and such an event has yet to be experimentally confirmed.

This research focuses on predicting whether the GZ-effect can be measured using the network of HiSPARC stations which are spread through the Netherlands, the UK and Denmark. To do so, a simulation is performed on primary cosmic ray particles in the energy range of 10^{16} to 10^{20} eV. The particles' trajectories are predicted using detailed models of the photodisintegration process and the interplanetary magnetic field. These GZ-particles are then analyzed using a model for the HiSPARC detectors in order to calculate realistic detection rates.

The results of the simulations show that the expected detection rate of GZ-events for the HiSPARC detector network is approximately 10^{-4} yr^{-1} .

Supervisors: prof. dr. ing. Bob van Eijk & prof. dr. Paul Kooijman



NEDERLANDSE SAMENVATTING

Kosmische straling zijn geladen deeltjes die door het heelal bewegen. Aan het begin van de 20e eeuw werd ontdekt dat de straling hoofdzakelijk bestaat uit atoomkernen. Sinds die tijd wordt er veel onderzoek naar de straling gedaan, maar vragen over de oorsprong van deze deeltjes en hoe ze energieën van soms wel 10^{20} eV bereiken zijn nog niet beantwoord. Aangezien het lastig is om deze deeltjes met hoge energieën te detecteren is nog weinig bekend over de massa samenstelling van de straling.

In 1960 werd een mogelijke oplossing voor dit probleem gepresenteerd door de Russische natuurkundigen Gerasimova en Zatsepin. Zij voorspellen dat deze hoog energetische deeltjes ($E > 10^{15}$ eV) uiteen kunnen vallen in twee fragmenten door in het heelal te botsen met een foton. De twee fragmenten veroorzaken, als ze de atmosfeer van de aarde bereiken, allebei een "deeltjesdouche" (shower) die kan worden gemeten. Wanneer de energieën van beide showers worden gemeten, kan met massagetal van het oorspronkelijke deeltje worden afgeleid. Dit mechanisme wordt het GZ-effect genoemd, maar is tot op heden nog niet experimenteel bevestigd.

In deze scriptie is door middel van een simulatie bepaald of het GZ-effect kan worden gemeten met behulp van het HiSPARC netwerk. Dit netwerk bestaat uit meer dan honderd detectoren verspreid door Nederland, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk en is ontworpen om kosmische straling te detecteren. In de simulatie zijn ruim 500 duizend GZ-events gesimuleerd die allemaal twee showers veroorzaken in de atmosfeer van de aarde. Vervolgens is bepaald in hoe veel van deze gevallen beide showers kunnen worden gedetecteerd door detectors in het HiSPARC netwerk. De simulaties tonen aan dat het HiSPARC netwerk op dit moment in staat is om ongeveer eens in de tienduizend jaar een GZ-event te detecteren.

ACKNOWLEDGEMENTS

First of all, I would like to thank Jeffrey for all the work he did the past few months during our co-operation in this project. Even after these past months of us working together and sharing one workplace at Nikhef we are still good friends and have not encountered any major problems. For this, I'm grateful. I thank Niek for our monday morning talks. Your suggestions and feedback on our work on both the learning module and this thesis have helped us greatly and for this, I thank you.

I want to thank Bob for his feedback on our work. Sometimes, you were hard to find, but your input has been valuable. Thank you. I also want to thank you and Paul for reading and grading this thesis.

I want to thank Gerard for his contribution to this project. Your presence in our office made it possible to discuss about things whenever we we're stuck. I also enjoyed the time we both worked at Nikhef, because you're a nice guy to spend time with.

I want to thank Arne who, together with Niek, has shown us how to build a HiSPARC station and has taken us on a tour around the roofs of Nikhef. I want to thank you as well for your help whenever we were stuck.

I thank Sven Lafèbre who, although we never met, has played a big role in this project. You sent us your computer code with which you made a simulation on measuring GZ-events with the Pierre Auger and Lofar observatories and without this example program to start from, I can not imagine how we would ever have finished this project in time. For this, I thank you.

I want to thank Matthijs and Aart-Jan for their feedback on the learning module.

Last but not least, I would like to thank Mark, Gerard and Jeffrey for our countless matches of foosball. These matches were a nice break from working on our simulation and must have provided Nikhef with enough finances to organize a large bbq.

Bas

PREFACE

The work presented in this thesis was done in close collaboration with Jeffrey Wouda. However, we both wrote our thesis individually and have put emphasis on different aspects of the theoretic background as is further explained in at the end of this section.

This thesis aims to answer the question whether it is possible to measure GZ-events using the HiSPARC network and what the expected detection rate will be. This is determined by expanding on the work of Sven Lafèbre from the Radboud University Nijmegen who worked on a similar simulation for the Auger observatory. Furthermore, the correlation between the separation distance between two showers and the mass of the original particle is explored. Finally, the possibility of the showers having a preferred orientation relative to each other is investigated.

To answer these questions, section 2 presents an overview of existing literature on cosmic rays, the Gerasimova-Zatsepin effect and HiPSARC is presented. Section 2.1 treats the properties of cosmic rays, where they come from and how extensive air showers are formed in the earth's atmosphere. An emphasis is placed on the mechanisms involved to accelerate cosmic ray particles to their ultra high energies. Section 2.2 gives a detailed description of the GZ-effect and how the photodisintegration process works. Here, the way particles are deflected by the interplanetary magnetic field is emphasized. Section 2.3 presents information on what HiSPARC is, and what types of detectors are being used. Section 3 gives a detailed description of how the simulations were performed and presents some assumption that were made. The results are presented in section 4. Section 5 presents the conclusion and discusses the limitations of the simulation and the consequences of the assumptions. Furthermore, some recommendations for the future of the HiSPARC project are presented. Finally, the appendices contain some additional plots that were made in the simulations (appendix A) as well as a learning module for secondary school students (appendix B). This learning module was written together with Jeffrey Wouda, parallel to the rest of the work in this thesis. It focuses on how cosmic rays were discovered and treats subjects ranging from the electromagnetic spectrum to the structure of an atom.

Contents

1	INTRODUCTION	11
2	THEORY	12
2.1	Cosmic rays	12
2.1.1	Energy spectrum	13
2.1.2	Cosmic ray sources	14
2.1.3	Acceleration mechanisms	14
2.1.4	Cosmic rays in the earth's atmosphere	17
2.2	The Gerasimova-Zatsepin effect	19
2.2.1	Spallation	19
2.2.2	Interplanetary magnetic field	19
2.2.3	Determining the mass number of the original UHECR particle	22
2.3	HiSPARC	22
2.3.1	Scintillator detector	23
2.3.2	Trigger	25
3	SIMULATION	26
3.1	GZ-events	26
3.2	Data analysis	26
4	RESULTS	29
5	CONCLUSION	33
5.1	Discussion	33
6	BIBLIOGRAPHY	35
A	APPENDIX: SIMULATION PLOTS	39
B	APPENDIX: LEARNING MODULE 'COSMIC RAYS'	41

1 INTRODUCTION

Cosmic rays have been, since the discovery of their nature in the beginning of the 20th century, an important subject of research in both the fields of astronomy and (astro)particle physics. Since then, many fundamental discoveries were made by observing cosmic rays, starting with the discovery of the positron in 1933. After this, the discovery of the muon (1937), the discovery of charged pions (1947) and the discovery of strangeness (1950s) followed [1]. Particle physicists used cosmic rays as their main tool for their research. Of course, there are also still unanswered questions concerning cosmic rays. For example, there is no agreement (yet) on where the cosmic rays come from and how they reach their very high energies of sometimes up to 10^{20} eV.

The mass composition of cosmic ray particles with very high energies ($E > 10^{15}$ eV) is not yet understood properly. As a possible solution to this problem, Russian physicists Gerasimova and Zatsepin proposed a theory in 1960 in which these ultra-high energy particles break into two fragments which create two particle showers in the earth's atmosphere [2]. By measuring the energies of these two showers, one is able to determine the mass number of the original particle. This mechanism was named after its inventors: the Gerasimova-Zatsepin effect (GZ-effect).

Although it seems like it concerns two completely different subjects, the search for GZ-events shows some similarities with the search for the Higgs boson. Both of the underlying theories date back to the 1960s. Both phenomena are widely accepted in the scientific community and are expected to exist. The search for both phenomena has taken many years. However, the two subjects have one big difference: where the Higgs boson was experimentally confirmed in 2012, the existence of GZ-events has not yet been experimentally confirmed.

2 THEORY

2.1 Cosmic rays

The discovery of cosmic rays dates back to the year 1785 when French physicist Charles-Augustin de Coulomb noticed that his electroscope spontaneously discharged due to an unknown interaction with the air [3]. Of course, De Coulomb did not right away attribute this spontaneous discharge to the existence of cosmic particles flying through Earth's atmosphere. This realization took another century and additional research by some of the most famous physicists [1].

When Wilhelm Röntgen discovered a 'new' type of radiation coming from cathode ray tubes (which he named X-rays), this was considered to be a possible explanation for the spontaneous discharge [4]. Expanding the work of Röntgen, Antoine Henri Becquerel suspected that the X-rays were caused by sunlight [5]. He performed an experiment using an uranium salt and he discovered this material's ability to emit ionizing radiation without exposing it to sunlight: spontaneous radioactivity. Although these discoveries looked promising, further experiments led to the conclusion that they were not the cause of the spontaneous discharge.

At the beginning of the 20th century, the unknown radiation was believed to be coming either from space, the earth's crust or radioactivity in the earth's atmosphere [6]. It was Italian physicist Domenico Pacini who was the first to present evidence for the extra-terrestrial origin of the unknown radiation when he measured its flux both *on* the water surface as well as *below* it [7]. He found that the flux was decreasing as he measured deeper below the water surface, indicating that the radiation was coming from above.

It took another 20 years before the majority of the scientific community accepted the extra-terrestrial origin of the radiation and the term 'cosmic rays' was introduced by Robert Millikan. About ten years later, it was also widely accepted that cosmic rays (mostly) consist of charged particles.

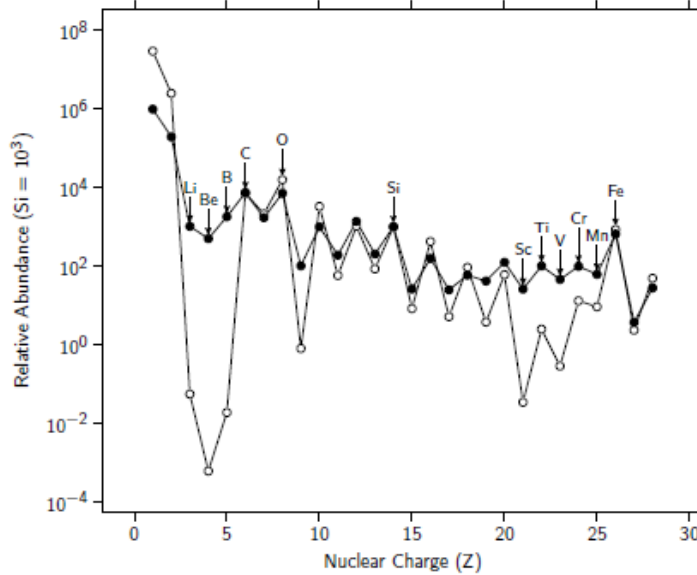


Figure 1: Relative abundance of elements in cosmic rays and the solar system. The closed circles show the relative abundances of elements in cosmic rays and the open circles indicate the relative abundances of the elements in the solar system. The data are normalized, with the abundance of Si set to 10^3 . Figure taken from [8]. This plot is generated using data from [9, 10, 11, 12].

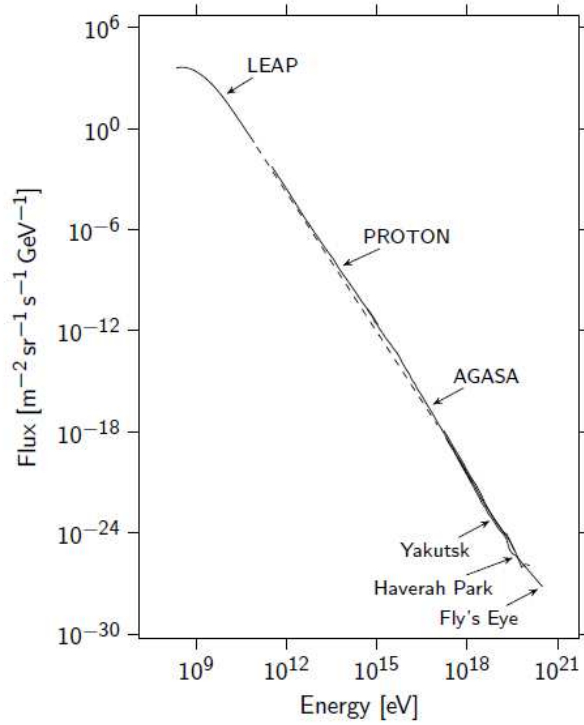


Figure 2: Energy spectrum of primary cosmic rays. Figure taken from [8]. This plot was made using data from [13]

2.1.1 Energy spectrum

Cosmic rays consist of charged particles that fly through space with relativistic speeds. Experiments have shown that the majority of cosmic rays consist of protons (84%). Alpha particles (12%) are a second large contributor to the composition of cosmic rays. Most of the remaining cosmic rays consist of heavier nuclei. Figure 1 shows the relative abundances of elements in the solar system [10]. The closed circles represent the relative abundances of the elements in cosmic rays where the open circles represent their relative abundances in the entire solar system. It is obvious that the two sets share large similarities, but the abundances of for example Li, Be and B are much higher in cosmic rays than in the rest of the solar system. This difference is partially caused by spallation, which will be discussed in section 2.2.1. However, the majority of the difference is caused by proton-proton interactions.

Figure 2 shows the energy spectrum of primary cosmic rays. These are the cosmic rays that reach the earth's atmosphere but have not had any interaction with the atmosphere yet. The plot in figure 2 is generated using data from several experiments which are labeled in the plot. The energy spectrum follows a power law $F(E) \sim E^{-\gamma}$ where the spectral index $\gamma \sim 3$. In figure 2, the dashed line corresponds to a spectral index of $\gamma \sim 2.75$. The dashed line is presented to illustrate the difference with the actual data. This approximation holds for the energy range $10^{11} \text{ eV} < E < 4 \cdot 10^{15} \text{ eV}$. The upper limit ($E = 4 \cdot 10^{15} \text{ eV}$) is called the *knee* of the energy spectrum and it labels the energy where the spectral index changes to $\gamma \sim 3.1$. The reason why this 'knee' in the energy spectrum can be observed is not known. A possible explanation is that above this energy cosmic rays start to leak away from our galaxy, because they can not be contained anymore by the interplanetary magnetic field. Another explanation suggests that this energy is the maximum energy to which cosmic ray particles can be accelerated by sources in our galaxy [8].

When the energy of the cosmic ray particles increases even more, the energy spectrum becomes less steep, which is called the 'ankle' of the energy spectrum. Here, the flux is so low that the measurements show very low statistics [8]. The origin of the ankle can be explained by the so-called GZK-limit. Greisen, Zatsepin and Kuzmin predicted that ultra-high energy cosmic rays (UHECRs, $E > 10^{18} \text{ eV}$) will interact with the cosmic microwave background (CMB). Above a certain energy threshold, the GZK-limit, a collision between a cosmic ray particle and a CMB photon contains enough energy to produce a pion. The production of the pion results in an energy loss for the cosmic ray particle in each collision until its energy has decreased below the GZK-limit. For UHECRs, the GZK-limit is $50 \cdot 10^{18} \text{ eV}$ [8]. Above this energy, you expect to see less cosmic ray particles, which explains the smaller slope of the energy spectrum in this energy region.

2.1.2 Cosmic ray sources

The closest source of cosmic rays is, of course, the sun which can accelerate protons using time-dependent magnetic fields. These magnetic fields appear as sunspots. Protons which are accelerated by the sun reach energies which lie in the GeV -range [9]. Figure 2 shows that the energies of cosmic ray particles can reach values which are many orders of magnitude larger than this. Cosmic ray particles with such high energies are most likely associated with the most energetic processes known in the universe like supernova explosions, magnetic gas clouds or highly magnetized spinning neutron stars (i.e. pulsars, accreting black holes) [9].

Charged cosmic ray particles are deflected by the interplanetary magnetic field. When the energy of the particles is below 10^{14} eV , they are distributed in a highly isotropic fashion, meaning that the direction of arrival of these particles is not correlated with the direction of their source [8]. At energies above 10^{19} eV , the direction of the arrival *should* be in correlation with the direction of the source of the cosmic ray particles. The existence of extra-galactic sources of cosmic ray particles is proven by a lack of correlation with the galactic plane. It should be noted that a very high resolution in arrival direction is required in order to be able to accurately determine the source of the particles. This is due to the extremely large distances traveled by the cosmic ray particles.

2.1.3 Acceleration mechanisms

When the cosmic ray particles are produced, they have to collect a sufficient amount of energy to be able to escape from their source. For this to happen, the energy has to be high enough for the Larmor radius to exceed the radius of the source. The Larmor radius (r_{Larmor}) is the radius in which a charged particle is contained in a uniform magnetic field B .

$$r_{\text{Larmor}} = \frac{m v}{Z e B} \quad (1)$$

The Larmor radius can be calculated using (1) where m is the mass of the charged particle, v is its velocity, Z is its atomic number and B is the magnetic field. In the relativistic case, m can be replaced by γm_0 where γ is the Lorentz factor and m_0 is the particle's rest mass. Also, $v \approx c$, which leads to a new expression for the Larmor radius.

$$r_{\text{Larmor}} = \frac{\gamma m_0 c}{Z e B} \quad (2)$$

For particles to acquire very high energies, their source should have either a very strong magnetic field B or a very large size. If the source is very large, a small magnetic field ($\sim \mu\text{G}$) is sufficient to accelerate the particles [8].

There are many possible ways to accelerate the cosmic ray particles to ultra-high energies. The rotating magnetic fields of a pulsar generate strong electric fields which are able to accelerate the cosmic ray particles. This is an example where the particles are accelerated very quickly. Other acceleration mechanisms work more slowly of which two will be discussed below: shock acceleration and Fermi acceleration. Although other models exist, these two are the most well-known processes responsible for accelerating cosmic ray particles to ultra-high energies.

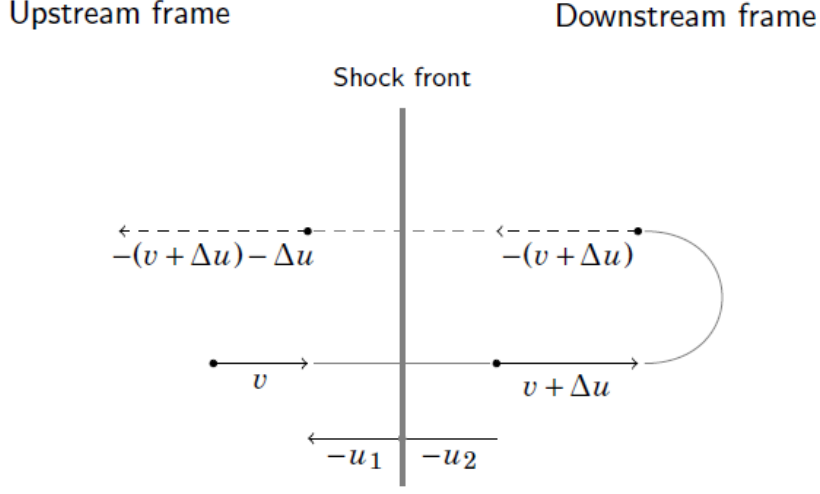


Figure 3: Shock acceleration. A particle with velocity v moves through the shock front from the upstream side. On the downstream side, the particle collides with a magnetic cloud which directs the particle back through the shock front. Figure redrawn from [8].

Shock acceleration At the end of a massive star's life, it will implode and a compact neutron star is formed. This process causes a part of the star's mass to be ejected at very high speeds into the interstellar medium (ISM) resulting in a shock front which is caused by electromagnetic fields. A shock front typically has magnetic inhomogeneities both preceding and following it. Figure 3 shows the situation from the perspective of the shock front where a magnetic fields travel towards the front (upstream) with a velocity u_1 . On the other side of the front (downstream) the magnetic fields travel away from the front with a velocity u_2 , which is smaller than u_1 [8]. The difference in velocity can be represented by $\Delta u = u_1 - u_2$.

A particle with velocity v and kinetic energy $E_0 = \frac{1}{2}mv^2$ coming from the upstream side can cross the shock front and be deflected by the magnetic fields on the downstream side. When this deflection is large enough, the particle may cross the shock front again. The particle's new kinetic energy E_1 of the particle can then be derived using figure 3, resulting in

$$E_1 = \frac{1}{2}m(-v - 2\Delta u)^2 = \frac{1}{2}m(v^2 + 4\Delta u^2 + 4v\Delta u) \quad (3)$$

The amount of energy that the particle has gained in this collision is given by

$$\Delta E_1 = E_1 - E_0 = \frac{1}{2}m(4\Delta u^2 + 4v\Delta u) \quad (4)$$

This result leads to a relative energy gain which is given by

$$\frac{\Delta E_1}{E_0} = \frac{\frac{1}{2}m(4\Delta u^2 + 4v\Delta u)}{\frac{1}{2}mv^2} = 4\left(\frac{\Delta u^2}{v^2} + \frac{\Delta u}{v}\right) \quad (5)$$

Using $v \gg \Delta u$, the first term is negligible

$$\frac{\Delta E_1}{E_0} \sim \frac{4\Delta u}{v} \quad (6)$$

Because there are magnetic fields on both sides of the shock front and $v \gg \Delta u$, a particle can pass through the front countless times. Shock acceleration is believed to be the primary process for accelerating cosmic

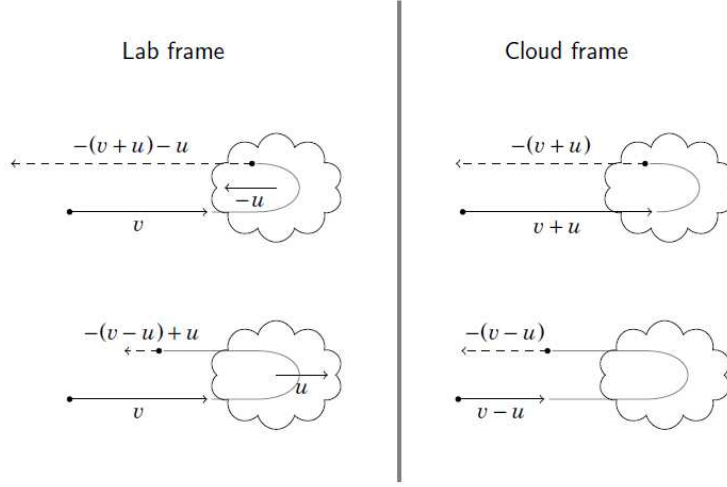


Figure 4: Fermi acceleration. In the top half of the figure, a particle with velocity v moves towards a magnetic cloud with velocity $-u$. This collision results in an increase of the particle's energy. In the bottom half of the figure, the cloud has velocity u . Now, the particle's energy decreases when it overtakes the cloud. Figure redrawn from [8].

ray particles to very high energies. Because the relative energy gain is linear, shock acceleration is also referred to as first order Fermi acceleration.

Fermi acceleration The process of Fermi acceleration describes interactions of cosmic ray particles with magnetic clouds which, according to Fermi, fill the ISM. When a particle enters such a cloud and is not deflected, its energy will not have changed as only elastic scattering exists in the magnetic fields. However, when a particle is deflected by the magnetic field, this means that the particle's energy has changed. In order to determine how much energy the particle has gained, two transformations must be performed: from the lab frame to the cloud frame, and then back from the cloud frame to the lab frame [8]. In figure 4, two different situations are shown. The top part shows a situation where a particle travels towards the cloud with a velocity v , so the particle has a kinetic energy $E_0 = \frac{1}{2}mv^2$. The cloud is approaching the particle with a velocity $-u$. When the two transformations that were mentioned before are applied, the particle's velocity changes to $v_1 = -v - 2u$. The particle's kinetic energy E_1 thus becomes

$$E_1 = \frac{1}{2}m(-v - 2u)^2 = \frac{1}{2}m(v^2 + 4u^2 + 4uv) \quad (7)$$

Now, the amount of energy that the particle has gained can be easily calculated.

$$\Delta E_1 = E_1 - E_0 = \frac{1}{2}m(4u^2 + 4uv) \quad (8)$$

The bottom half of figure 4 shows a situation where the particle moves towards the cloud with velocity v , but the cloud now moves in the same direction as the particle with velocity u . Again, when you apply the two transformations the kinetic energy of the particle can be found to be

$$E_2 = \frac{1}{2}m(-v + 2u)^2 = \frac{1}{2}m(v^2 + 4u^2 - 4uv) \quad (9)$$

and the particle's change in energy is given by

$$\Delta E_2 = E_2 - E_0 = \frac{1}{2}m(4u^2 - 4uv) \quad (10)$$

From (10), it can be concluded that the particle loses energy in the collision (ΔE_2 is negative) since $v > u$. If $v < u$, the particle could not overtake the magnetic cloud.

The mean amount of energy gain a particle experiences due to a collision with a magnetic cloud is given by

$$\frac{\Delta E_1 + \Delta E_2}{E_0} = \frac{\frac{1}{2}m(8u^2)}{\frac{1}{2}mv^2} = 8\frac{u^2}{v^2} \quad (11)$$

Since the mean energy gain is proportional to the square of the velocity of the magnetic cloud, this acceleration process is often referred to as second order Fermi acceleration. Assuming $v \gg u$, the mean energy gain in each collision is very small. This leads to the conclusion that this process requires long time scales to accelerate particles and therefore it may not work in practice [8].

Once a cosmic ray particle is accelerated enough for it to escape from its source, it will propagate through the ISM which is filled with magnetic fields, matter and radiation fields. The (charged) cosmic ray particles interact with these (randomly oriented) magnetic fields. The deflection of charged particles by a magnetic field results in an energy loss due to the emission of synchrotron radiation [14]. When the cosmic ray particles interact with matter, secondary particles are produced which also leads to a decrease of the cosmic ray energy. On average, the energy loss due to interactions in the ISM is small, because the column density which is traversed by the particles is in the order of a few $g\,cm^{-2}$ where the column density of Earth's atmosphere in comparison is $1030\,g\,cm^{-2}$ [8]. This results in a much longer mean free path for particles in the ISM than in the earth's atmosphere.

2.1.4 Cosmic rays in the earth's atmosphere

The first interactions between the primary cosmic rays and particles in the atmosphere occur at heights between $15\,km$ and $20\,km$ [8]. After this, the cosmic ray particles can undergo many different types of interactions.

Charged particles can lose their energy by transferring energy to atomic electrons (ionizing the atoms), radiating photons while interacting with electromagnetic fields of atomic nuclei (Bremsstrahlung) or deflection by Coulomb forces (Rutherford scattering). These processes are responsible for the majority of the energy loss, although other processes (synchrotron radiation, Cherenkov effect) also occur. Primary cosmic rays that undergo these interactions with the atmosphere will create secondary particles, which in their turn also create new particles, etc. The number of particles dramatically increases until the energy is not sufficient to create any new particles. After this, the low-energy particles will be absorbed by the atmosphere. If a large number of secondary particles reach the ground level, the produced particles (cascade) are called an extensive air shower (EAS). Such an EAS can be spread over an area of several km^2 .

Electromagnetic shower When a shower consists of electrons and photons, it is called *electromagnetic*. These showers are caused either by cosmic ray electrons and photons, or electrons and photons that have been created as secondary particles. A photon that is created in Bremsstrahlung ($e \rightarrow e + \gamma$) can be used in pair production ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$). The electron created in this process will in turn be used in the Bremsstrahlung process. These two types of interactions alternate and are dominant in the creation of electromagnetic showers. Each interaction occurs after an interaction length λ and will create two particles, each carrying half of the parent's energy [8]. This will continue until the energy of the created particles drops below the critical energy at which no new particles can be created.

Hadronic shower When a shower is created by cosmic ray protons and nuclei, it is called *hadronic*. The interactions responsible for these showers mainly result in the creation of pions and kaons [8]. One of the possible interactions is

$$p + p \rightarrow p + \Delta^+ \rightarrow p + p + \pi^0$$

In this interaction, the Δ^+ may also decay into a proton and a charged pion. The created pions will decay into muons, electrons, neutrinos and photons. For example:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

The photons created in this process will initiate electromagnetic showers. In this way, the largest part of the primary energy will be used to form electromagnetic showers.

Extensive air showers at ground level Figure 5 shows the development of the number of photons, electrons and muons in an EAS caused by a proton with an energy of 10^{15} eV . The lines show that at an atmospheric depth of about 400 g cm^{-2} , the number of particles in the EAS has a maximum. When the particles go even deeper into the atmosphere, the number decreases. Apparently around this point, the absorption of secondary particles dominates over the creation of new particles. A difference can be observed between the muons and the photons/electrons. The number of muons decreases much slower after the shower maximum. This can be explained by the fact that muons have very few interactions before they reach the ground.

In order to be able to detect an EAS reasonably well at ground level, the primary cosmic ray particle should have a minimum energy of about 10^{14} eV . Primary cosmic ray particles with lower energies will not generate showers that reach ground level. However, the muons that are created in such low-energy showers *can* reach ground level, because they have a decay length of about 6.2 km . Due to this fact, about 80 % of all charged particles at sea level are muons [8]. Figure 5 shows however that the number of muons in an EAS is only about 10 % of the total number of particles in the EAS. This means there is a large number of background muons to consider when looking at extensive air showers.

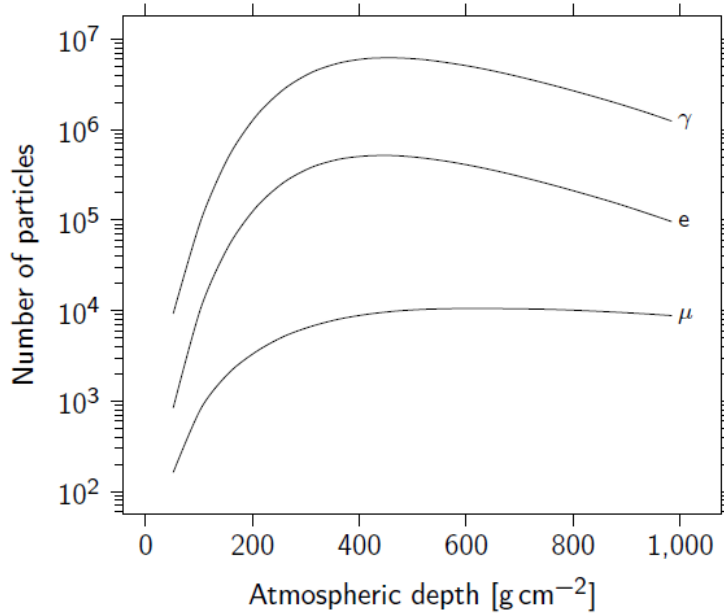


Figure 5: Development of the number of particles in an EAS initiated by a 10^{15} eV proton. Figure taken from [8].

2.2 The Gerasimova-Zatsepin effect

In 1960, Russian physicists Gerasimova and Zatsepin proposed a method in order to determine the mass composition of high energy cosmic rays ($E > 10^{15} \text{ eV}$) [2]. This knowledge could provide important information about the acceleration mechanisms and the composition of the sources of these cosmic ray particles. The theory (GZ-effect) considers the possibility that an atomic nucleus with an energy higher than 10^{15} eV is split into two parts due to an interaction with a high-energy photon coming from the sun which breaks the particle in two fragments (section 2.2.1). Because of the different electrical charges of the two remnants, they will be deflected by the interplanetary magnetic field in a different way (section 2.2.2). When both these remnants reach the earth's atmosphere, they will create two separate air showers, arriving at essentially the same time and from the same direction, but with a certain separation between them. The mass number A of the original disintegrated particle can then be calculated using the energies of the two showers [15, 16].

No detection of a Gerasimova-Zatsepin event has ever been reported.

2.2.1 Spallation

In the solar system, it is possible for cosmic ray particles to interact with highly energetic photons coming from the sun. This results in a photodisintegration of the cosmic ray particle breaking it into two fragments (spallation).

The solar photon flux is believed to be that of a blackbody with the same temperature as the sun's surface: $T_{eff} = 5770 \text{ K}$ [15]. Therefore, the number density of photons is given by

$$\frac{dn}{dE} = 7.2 \cdot 10^7 \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E}{k_B T_{eff}}\right) - 1} \frac{1}{r^2} \quad (12)$$

Here, r is the distance from the sun in AU , E is the photon energy and k_B is the Boltzmann constant.

The probability η_{GZ} for a cosmic ray particle to undergo a photodisintegration on its way to Earth is also given in [15].

$$\eta_{GZ} = 1 - \exp\left(-\int_0^\infty d\xi \frac{1}{\lambda(\xi)}\right) \quad (13)$$

where $\lambda(\xi)$ is the mean free path of the particle and ξ is a coordinate measuring the distance from the earth along the arrival direction of the cosmic ray particle. The integral is performed up to $\xi = 4 AU$, because the probability for photodisintegration beyond this distance is negligible due to a very low solar photon flux. The probability that a particle undergoes photodisintegration turns out to be small ($\eta_{GZ} \ll 10^{-3}$), because the mean free path is much larger than the characteristic dimensions of the solar system.

When you transform from the sun's reference frame to the earth's reference frame, the two fragments emitted in the photodisintegration process are concentrated within a cone with an aperture of $\sim 1/\gamma$ around the propagation direction of the parent nucleus. Because of the very high Lorentz factors in the photodisintegration process, one can assume that both fragments travel in the same direction as the parent nucleus did [17].

Figure 1 showed that some elements in cosmic rays are much more abundant than what you would expect from looking at the rest of the universe. For example the elements Li, Be and B are orders of magnitude more often seen in cosmic rays than in the total universe. This difference is caused by the photodisintegration process as described in this paragraph. The spallation of C- and O-nuclei results often in Li, Be and B fragments, therewith increasing their relative abundancies in cosmic rays.

2.2.2 Interplanetary magnetic field

After the photodisintegration, the charged fragments will be deflected by the interplanetary magnetic field. Since both fragments in general have different charge-to-mass ratios, their deflections will be quite different. The fragments are mainly deflected by the magnetic field that is caused by the sun. The

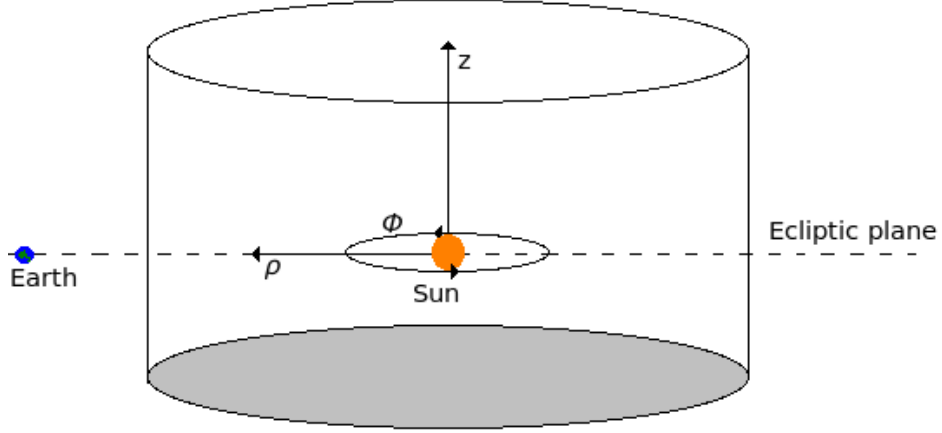


Figure 6: Coordinate system used to describe the interplanetary magnetic field. Figure taken from [19].

earth's magnetic field can be neglected when looking for GZ-events, because it only works on distances very close to the earth. Further away, the magnetic fields that are caused by the sun are dominant. A three-dimensional model of this very complicated magnetic field is presented in [18]. The model describes the magnetic field within a sphere around the sun with a radius of $20 AU$. The interplanetary magnetic field changes with time as a result of the solar cycle. This solar cycle causes a part of the interplanetary magnetic field to change direction once every 11 years. This time-dependency of the interplanetary magnetic field is not considered in [18] and therefore it is also not considered in this simulation. Instead, the simulation considers a static interplanetary magnetic field.

Figure 6 shows that the magnetic fields are described using cylindrical coordinates. The ρ -component is directed along the ecliptic plane, the ϕ -component rotates around the sun, parallel to the ecliptic plane and the z -component is directed perpendicular to the ecliptic plane. The used model assumes that the magnetic field consists of four components.

Dipole component The dipole component of the magnetic field can be described using

$$B_{dipole,z} = \frac{B_s r_1^3}{2} (\rho^2 - 2z^2) (z^2 + \rho^2)^{-5/2}$$

$$B_{dipole,\rho} = -\frac{3B_s r_1^3}{2} \rho z (z^2 + \rho^2)^{-5/2}$$

$$B_{dipole,\phi} = 0$$

Here, $B_s r_1^3/2$ is the magnetic dipole moment of the sun. If r_1 is chosen to be the solar radius R_\odot , one finds that B_s is the dipole field at the north pole of the sun and it's chosen to be $B_s = 2 G$. The sign of the dipole component changes with every 11-year solar cycle.

Sunspot component The sunspot component is approximated by the combined field of 180 spherical dipoles with a radius of $0.1 R_\odot$ which are distributed uniformly along a circle with a radius of $0.8 R_\odot$ in the equatorial plane. The expressions of these dipoles are exactly the same as with the dipole component, using $B_d = 1000 G$. See figure 7. This component does not change with the 11-year solar cycle.

Uni-polar dynamo component The uni-polar dynamo component is caused by the rotation of the sun in the dipole field (figure 7). It is generated by a sheet current distribution flowing outwards along the polar axis. Then, it flows along the heliosphere towards the ecliptic plane and then radially inwards back to the sun. The resulting field is in the ϕ -direction and can be described as follows:

$$B_{dynamo,\phi} = \text{sign}(z) B_{\phi_0} \frac{\rho_0}{\rho}, \quad r_1 < \sqrt{z^2 + \rho^2} < r_2$$

Here, $\rho_0 = 1 AU$ and $B_{\phi_0} = 3.5 \cdot 10^{-5} G$. The sign of this component does not change as a result of the

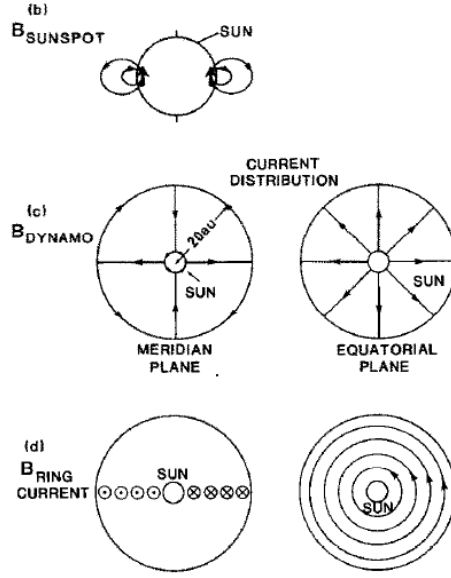


Figure 7: Illustration of the sunspot, dynamo and ring-current components of the interplanetary magnetic field. Figure taken from [18].

solar cycle.

Ring-current component The ring-current component comes from a sheet equatorial current reaching up to r_2 (figure 7). The expressions for the z - and ρ -components of the field are given by

$$B_{\text{ring},z} = B_{\rho_0} \rho_0^2 |z| (z^2 + \rho^2)^{-3/2}$$

$$B_{\text{ring},\rho} = \text{sign}(z) B_{\rho_0} \rho_0^2 \rho (z^2 + \rho^2)^{-3/2}$$

In these expressions, $\rho_0 = 1 \text{ AU}$ and $B_{\rho_0} = -3.5 \cdot 10^{-5} \text{ G}$. The sign of the ring-current changes as a result of the solar cycle.

The total interplanetary magnetic field B_{total} is given by $B_{\text{total}} = B_{\text{dipole}} + B_{\text{sunspot}} + B_{\text{dynamo}} + B_{\text{ring}}$. The ϕ -, ρ - and z -components of B_{total} can be plotted for a certain value of z as can be seen in figure 8. This plot shows for $z = 0.1 \text{ AU}$ how the magnetic field develops when the distance to the sun is increased. The plot shows that for $r > 1 \text{ AU}$, the ϕ -component is much larger than the other components. Although the shape of the curves differ for different values of z , on large distances from the sun the ϕ -component is always dominant over the other two. Appendix A presents plots of the total magnetic field for $z = 0.01$ (figure 16) and $z = 1$ (figure 17).

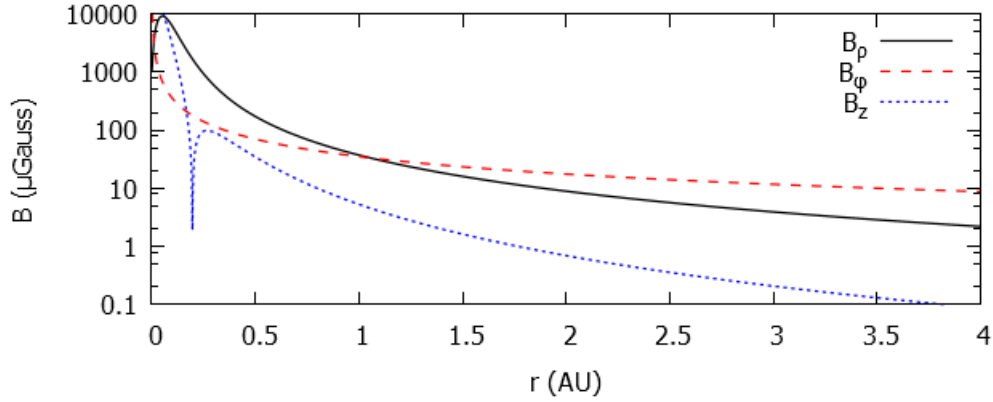


Figure 8: ϕ -, ρ - and z -components of the total magnetic field for $z = 0.1 \text{ AU}$. r is the distance from the sun. The z - and ρ -component lines have a minus-sign.

2.2.3 Determining the mass number of the original UHECR particle

In order to be able to make a prediction on the mass composition of a UHECR, one first has to measure both extensive air showers that are caused by the two fragments produced in the photodisintegration process. In this process, the probability for emitting one nucleon from the original particle is largest. Knowing this, the atomic number A of the original disintegrated particle can be determined using the energies of the two showers as is shown in this expression [20]:

$$A = \frac{E_1 + E_2}{E_1} \quad (14)$$

In this expression, E_1 and E_2 are the energies of the fragments' showers with E_1 being the less energetic shower.

2.3 HiSPARC

High School Project on Astrophysics Research with Cosmics (HiSPARC) is an experiment that measures cosmic rays with extreme high energies. The project focuses on collaboration with secondary schools and gives students the opportunity to participate in real scientific research. As a part of this, HiSPARC also creates and offers educational material for these schools (see appendix B). The detectors are assembled by secondary school students and placed on the roof of their school building. Because of this collaboration, HiSPARC has developed a wide array of detectors which spreads through the Netherlands, Denmark and the United Kingdom as can be seen in figure 9. This picture shows that the majority of the HiSPARC stations is located in the Netherlands. Currently, HiSPARC has 108 detector stations of which 73 are online (green circles in figure 9). The remaining locations are either experiencing a problem or are offline (yellow and red circles) [23]. The distances between all HiSPARC stations lie approximately between 100 m and 1000 km as can be seen in figure 18 in appendix A.

HiSPARC uses scintillator detectors and photomultiplier tubes (PMT), which will be discussed in section 2.3.1. These detectors are placed on the rooftops of school buildings inside skiboxes to protect them against influences from the weather. Each HiSPARC station is typically made up of either two or four detectors (2-plate stations and 4-plate stations). At a 2-plate station, the two detectors are separated by $\sim 5 - 6 \text{ m}$ (figure 10). A GPS is located between the two detectors. Currently, the majority of the HiSPARC stations have two detector plates.

Most 4-plate stations are made up of four detectors which lie in a star-shaped configuration as can be seen in figure 11. Three of the detectors in the station are positioned on the corners of an equilateral

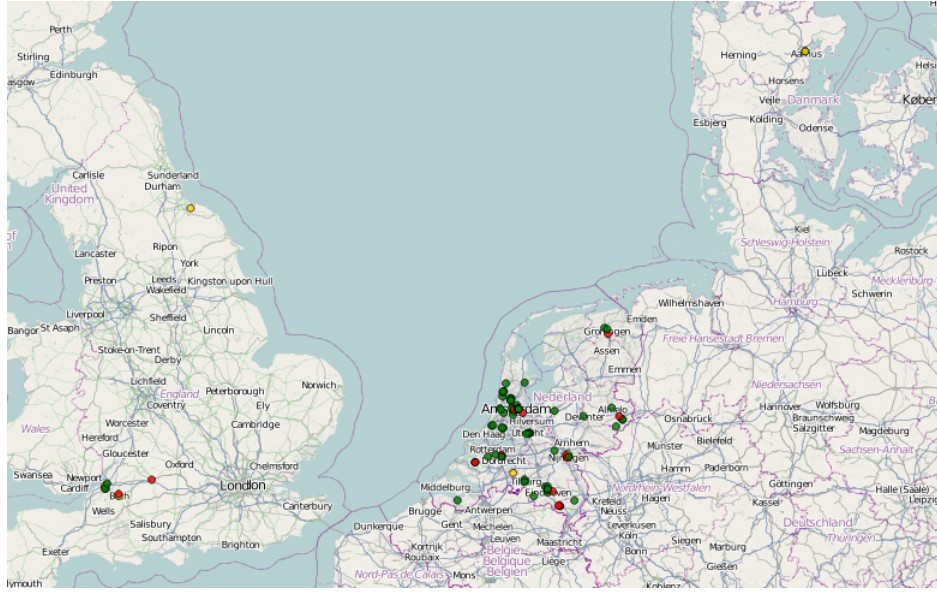


Figure 9: Overview of the locations of HiSPARC stations [21, 22].

triangle with sides of 10 m . The fourth detector is then placed in the geometric center of this triangle. The GPS is positioned at the middle of the base of the triangle. An alternative layout for a 4-plate station is currently introduced where the detectors are positioned in a diamond-shape configuration. In comparison to the layout shown in figure 11, detector 2 is positioned to the right of detector 1 at a distance of 10 m from detector 1 and detector 4.

The distances between the detectors in a HiSPARC station are chosen in order to fit the station on a typical rooftop of a school building [8]. For each HiSPARC station, only the number of detector plates and the position of the GPS is recorded. The exact position of each detector plate with respect to the GPS is not known. This would not be a problem if each station would follow the configurations as shown in figures 10 and 11. However, due to obstacles on the rooftops other causes these configurations are not always used. In order to interpret the data gathered in these stations correctly, HiSPARC is currently collecting the exact positions of each detector plate with respect to the GPS location.

2.3.1 Scintillator detector

Scintillation is the process in which a particle emits light when it travels through a material. When such a material (scintillator) is used in combination with an electronic light sensor like a photomultiplier tube, this is called a scintillator detector. Commonly used scintillators are made of plastics which are a solution of organic scintillators (fluors, typically anthracene is used) in a solid plastic solvent (base, polyvinyltoluene is often used) [8]. The energy of a particle that moves through a scintillator is partly absorbed by the base. The addition of a fluor is needed, because the base is not transparent for its own scintillation light, which means that light emitted by the base will be absorbed again by the base. The energy of the emitted light is transferred to the fluor through a mechanism that is not yet fully understood. The energy is then used to excite free valence electrons which are not bound to a single atom, but rather to complete molecules. After this excitation, the molecule will quickly decay back to a certain energy level (above the ground level) without emitting any radiation (internal degradation). When the molecule decays from this level to the ground state, it emits photons. These photons can not excite other fluor molecules to an excited state, so the fluor is transparent to these photons.

HiSPARC uses rectangular scintillator plates of $1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$. On one of the short ends of each plate, a

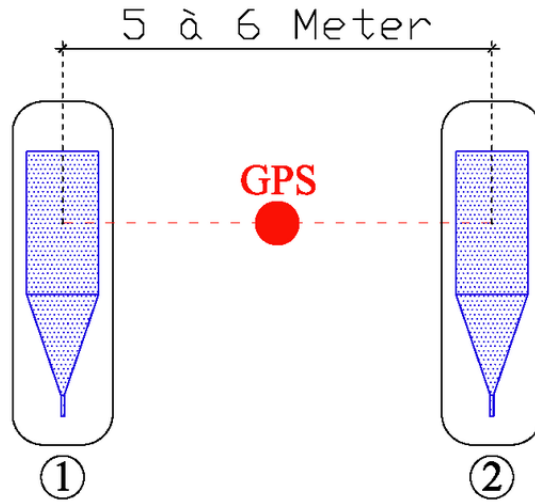


Figure 10: Layout of a 2-plate HiSPARC station [24].

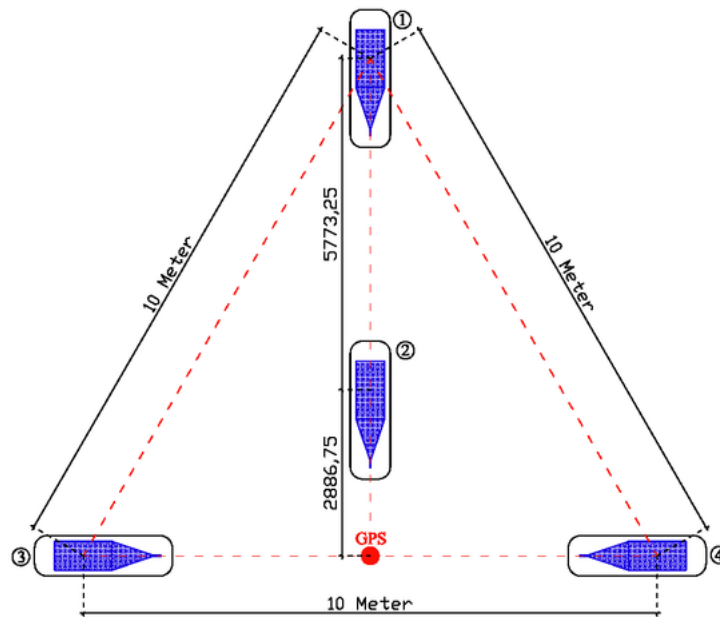


Figure 11: Star-shaped configuration of a 4-plate HiSPARC station [24]. In the diamond-shaped configuration, detector 2 is positioned to the right of detector 1 at a distance of 10 m from detector 1 and detector 4.

triangular lightguide is glued. This lightguide with a median of 30 *cm* leads the light to the photomultiplier tube which is attached at the far end of the lightguide. Simulations have shown that in the corners of the scintillator plate adjacent to the light guide the efficiency of guiding photons to the PMT is highest at about 2.3 % [8]. Although this seems like a low value, it is still sufficient to obtain a high efficiency in detecting the charged particles.

Photomultiplier tube Photomultiplier tubes (PMTs) are extremely sensitive detectors which, in theory, are capable of detecting single photons. The first PMT was designed in 1934 by Harley Iams and Bernard Salzberg.

A PMT is made up of a glass casing in which a high vacuum is held. Inside this casing, cathodes, anodes and dynodes are used to amplify the signal of incoming photons. Whenever a photon enters the PMT, it will hit a photocathode, producing electrons through the photoelectric effect. These electrons are directed and focused by an electrode. Then, the number of electrons will be dramatically increased by leading it through a series of dynodes, each held under an increasing high positive voltage. The electrons will be accelerated and collide into the dynodes, releasing new electrons on impact. These electrons will also be accelerated and release more electrons, etc. Once the electrons have hit all dynodes, they will reach the anode, creating a sharp electrical pulse which can be read out by a computer. The set-up of the PMTs that is used in the HiSPARC detectors is able to multiply the number of electrons by a factor of 10^6 . This number could easily be exceeded by increasing the voltage on the dynodes. Unfortunately, higher voltage requires an increased dead time [25].

HiSPARC uses PMTs that have a peak quantum efficiency of 28 % for wavelengths of 375 *nm* [26].

2.3.2 Trigger

HiSPARC works with a triggering system that uses two different signal thresholds for distinguishing between an actual particle and noise.

For a 2-plate HiSPARC station, if both detectors detect a signal which exceeds the low threshold, this is enough to identify an EAS; the probability that these events are correlated is high.

For a 4-plate station, there are two triggering methods. Whenever a signal exceeds the high threshold, the probability that a particle has generated this signal is quite high. When such a signal is recorded in at least two of the four detectors in a station, this is sufficient to identify an EAS. When the recorded signals do not exceed the high threshold, but at least three of the detectors in the station measure a signal that exceeds the low threshold, the probability that these are correlated is high and this is also enough to identify an EAS.

Using the hardware as mentioned in this section, a HiSPARC station is able to detect cosmic ray showers with energies as low as 10^{15} *eV*. It can detect showers coming from zenith angles between 0° and 45° .

3 SIMULATION

A simulation is performed to check whether there is a possibility to measure GZ-events using the network of HiSPARC detectors. The simulation follows the same steps as presented in [20] where the authors have calculated the expected detection rate of GZ-events for the Pierre Auger observatory in Argentina and the Lofar observatory in northwestern Europe.

The simulation consists of two parts. In the first part, a large number of highly energetic particles is generated which undergo a photodisintegration and are then deflected by the interplanetary magnetic field creating two extensive air showers. The second part simulates the possibility of actually measuring these showers using the HiSPARC network. As a check, the results from [20] were reproduced to check the validity of the program. The details of both parts of the simulation are discussed in the following two sections.

3.1 GZ-events

In the first part of the simulation, a large number of cosmic ray particles is generated. These particles' atomic numbers Z were randomly chosen between 2 (protons can not contribute to the flux of GZ-events) and 92. Subsequently, the particle's energies were randomly generated in the range between 10^{16} eV and 10^{20} eV . Using figures 1 and 2 it can be concluded that this method does not provide a realistic set of particles since the relative abundance of elements in the solar system varies strongly. Also, the flux of ultra-high energy cosmic ray particles is multiple orders of magnitude smaller than that of less energetic cosmic ray particles. However, the simulation corrects for these phenomena afterwards (section 3.2).

Each of the generated particles is placed at a random position in the solar system at a maximum distance of 4 AU from the sun. At their position, each particle will experience a photodisintegration causing it to break into two fragments. In this simulation is chosen to only consider the scenario where a neutron or a proton is emitted from the original nucleus, since this process has by far the largest cross section [8]. In fact, each particle is analyzed twice: once emitting a proton and once emitting a neutron as a result of the photodisintegration.

After the photodisintegration process, the fragments' trajectories are computed by using the model of the interplanetary magnetic field as presented in section 2.2.2. The model only considers cosmic ray particles that are moving in the direction of the earth. However, the two fragments can be deflected so much that one of them or both do not hit the earth's surface. At the end of the particles' trajectories, the energy of the showers, the distance between the two showers and the direction where the showers came from is saved. The curvature of the earth influences the distance between the two showers. The model takes this into account before analyzing the data, using a separation vector $\vec{\delta}$ which represents the actual distance between the showers on the earth's surface.

The simulation of the particles' photodisintegration and trajectories has resulted in a list with data of over 500 thousand GZ-events.

3.2 Data analysis

When generating GZ-events as described above, the atomic numbers and energies of the primary particles were chosen randomly and each atomic number and energy was generated approximately the same number of times. Of course, this is not a realistic scenario as heavy nuclei are observed much less frequently than light nuclei. Therefore, in the data analysis part of the simulation, this error is corrected for using expressions for the absolute particle fluxes for each type of primary nucleus as presented in [27]:

$$J_Z(E) = J_{0,Z} \left[\frac{E}{E_0} \right]^{\gamma_Z} \left[1 + \left(\frac{E}{E_p Z} \right)^{\gamma_1} \right]^{-\gamma_2} \quad (15)$$

Here, $J_Z(E)$ is the contribution of a particle with atomic number Z to the cosmic ray spectrum. $J_{0,Z}$ and γ_Z are constant factors that are specific to each type of nucleus. $E_0 = 10^{12} \text{ eV}$, $E_p = 4.5 \cdot 10^{15} \text{ eV}$, $\gamma_1 = 1.9$ and $\gamma_2 = 1.1$. This expression for the absolute particle flux for each species of nuclei underestimates the

number of low mass particles at high energies ($E \gtrsim 10^{19} \text{ eV}$). However, this has no consequence because of a very low photodisintegration flux for these particles. The total hadronic flux is obtained by adding all the contributions of the different species of nuclei.

$$J(E) = \sum_Z J_Z(E) \quad (16)$$

With, of course, $2 \leq Z \leq 92$. Using the results from (15) and (16), one can correct for the abundance of high mass nuclei in the generated list of GZ-events from section 3.1.

However, one also has to take into account the probability η_Z for a particle of species Z and energy E to undergo a photodisintegration. By multiplying the results from (13) and (15) (the photodisintegration probability and the particle flux) for each species of nuclei, one obtains the total GZ-flux J_{GZ} [20].

$$J_{GZ}(E) = \sum_Z J_Z(E) \int \eta_Z \cos\theta_0 d\theta_0 d\phi_0 \quad (17)$$

In this expression, θ_0 and ϕ_0 are the angles which define the arrival direction of the particle.

Detection rate

The GZ-event rate for a given detector can be calculated using the following expression [20]:

$$\Phi_{GZ}(E) = \int_E^\infty \sum_Z J_Z(E') \left[\int \eta_Z(E', \phi_0, \theta_0) A(\vec{\delta}, E', \phi_0, \theta_0) \times f_{dc}(\phi_0, \theta_0) \cos\theta_0 d\theta_0 d\phi_0 \right] dE' \quad (18)$$

In this expression, f_{dc} is the duty cycle of the detector which, for HiSPARC, is equal to 1. This assumption is not entirely true since section 2.3 mentions that some stations are offline, which would result in $f_{dc} \neq 1$. However, in this simulation the value of the duty cycle was chosen to be $f_{dc} = 1$. The effective aperture A of the detector can be calculated using

$$A(\vec{\delta}, E', \phi_0, \theta_0) = \frac{S_0}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \xi(\vec{\delta}') \omega(\theta, E) d\zeta_d d\zeta_y \quad (19)$$

In this expression, ζ_d and ζ_y are used to take into account the daily rotation of the earth and the precession angle of the earth with respect to the sun respectively. The angular sensitivity ω tells you which part of the sky, the detector can observe. HiSPARC can detect particles that come from zenith angles $< 45^\circ$. S_0 is the total area covered by the detector. Finally, $\xi(\vec{\delta}')$ is a function that describes the probability of measuring the second shower, which is separated from the first shower by separation vector $\vec{\delta}'$, under the assumption that the first shower is detected. This study assumes that the first shower hits a HiSPARC station exactly. In reality however, it is possible for a shower to be detected when its core is located at a certain distance from the HiSPARC station. Every shower has a certain width which is determined by the shower's energy. Detection of the first shower when the shower core is not located exactly at a HiSPARC station's location is not included in the used simulation. The influence on the results caused by this decision will be discussed in section 5.1.

Whether the GZ-event is detected by a second station as well depends on whether there is a station located at a separation $\vec{\delta}'$ from the first shower. Of course, the probability of exactly hitting a second station is very small, but extensive air showers have a certain width, depending on their energy. For showers with a high energy, the shower is much wider than with a lower energy. Using the information from [8, p. 31], this simulation defines a circle around each station. The radius of this circle is the distance from the station where you still have a 50 % probability of the station measuring the shower in at least two detectors. Using Poisson statistics, this corresponds to a particle density of the shower of 2.46 m^{-2} . For example, a shower with an energy of 10^{18} eV has a 50 % probability of being detected within a circle of approximately 500 m around the station. The total area S_0 of the HiSPARC network is

individually calculated for each GZ-event by adding the areas of the circles around the stations. Although the simulation considers 97 HiSPARC stations, the total area is calculated by using only 95 of the circles, which is an approximation in order to correct for overlapping circles of stations that are located very close to each other. In order to determine the flux for the first shower, the simulation uses the value for the total area.

In the used simulation, each of the generated GZ-events is analyzed in every station. This means that the position of the first shower is chosen precisely on the first station. Then, the program checks whether there is a station located at a distance δ' from this location. Subsequently, the same is done with the first shower detected in the second station, the third, the fourth, etc. The number of times that the two showers are both detected is a measure for the detection probability of the second shower.

4 RESULTS

In order to ensure the validity of the program code, the simulation was used to reproduce some of the results presented in [20]. The plots of the total intrinsic GZ-flux J_{GZ} and the photodisintegration probability η_{GZ} were compared to the same plots in [20]. The results of these validity checks were in agreement with those expected.

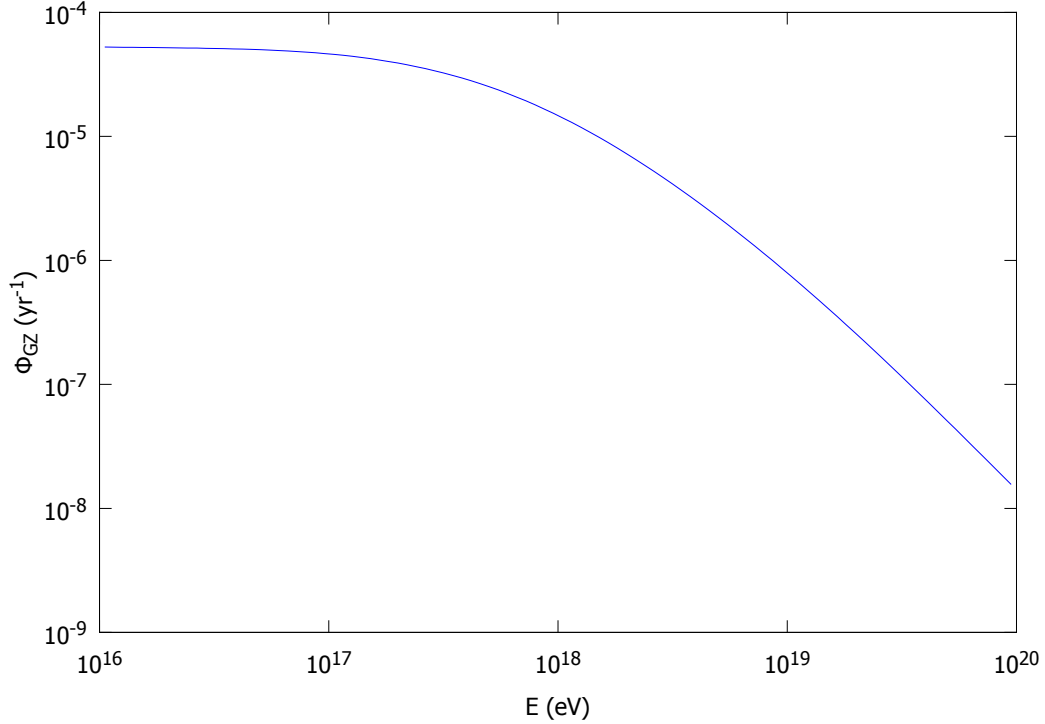


Figure 12: Expected integrated detection rate of GZ-events using the HiSPARC network. A maximum detection rate of approximately $10^{-4} yr^{-1}$ can be expected.

Expected detection rate for HiSPARC

The main focus of this thesis is to predict the detection rate of GZ-events using the network of HiSPARC stations. Figure 12 shows this expected integrated detection rate of GZ-events using the HiSPARC network. In this plot, the displayed value of the detection rate at an energy E is the expected detection rate for GZ-events having an energy of *at least* this energy. The maximum detection rate for particles with an energy of at least $10^{16} eV$ is thus approximately $10^{-4} yr^{-1}$ when using the current network of HiSPARC stations. This result is comparable to expected detection rates for GZ-events in the Pierre Auger observatory and the Lofar observatory [20]. A note should be made that the Pierre Auger observatory has increased their detector density on certain places in their network, which is expected to increase their expected detection rate of GZ-events. It is expected that the actual detection rate of HiSPARC will be higher as well, due to assumptions in this research. These will be discussed in section 5.1. After achieving the main objective, the difference between neutron and proton emission was investigated, as well as the orientation of the two showers with respect to each other. Finally, the flux of GZ-events as a function of the arrival direction of the showers was investigated. The results of these are presented in the following paragraphs.

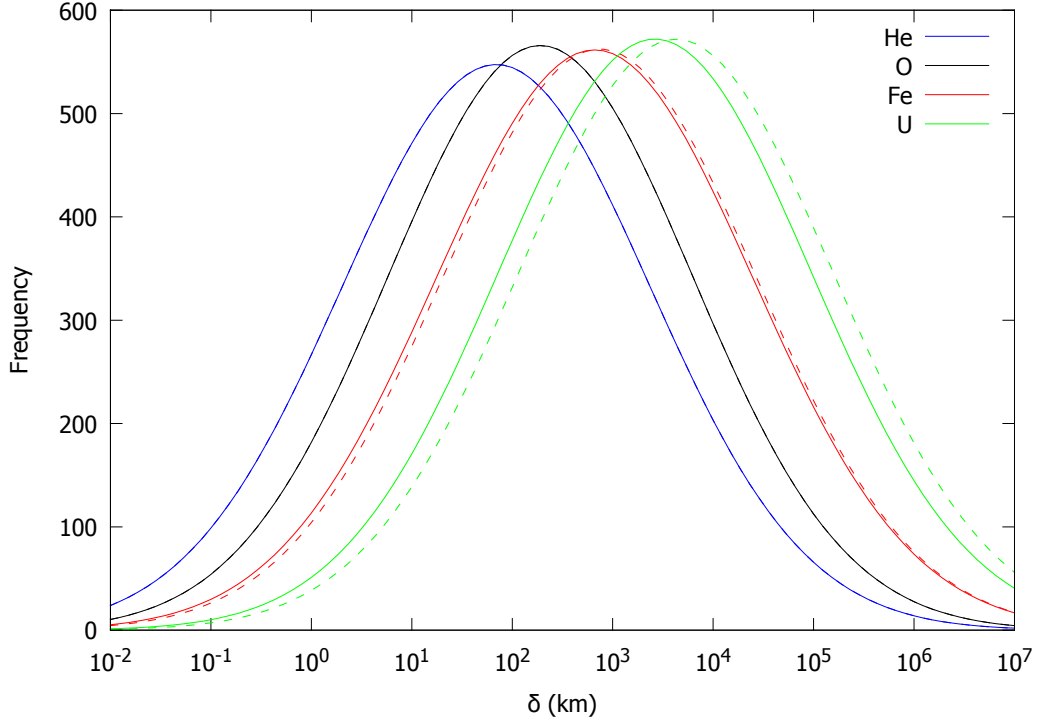


Figure 13: Distance between the two showers for He, O, Fe and U. Dashed lines indicate proton emission, solid lines indicate neutron emission.

Difference between proton and neutron emission

As mentioned before in section 3.1, this simulation only considers GZ-events in which a proton or neutron is emitted. It is interesting to examine whether there exists a difference in separation between the two showers in these processes. In figure 13, the distance between the showers is plotted for He, O, Fe and U. The dashed lines represent proton emission and the solid lines represent neutron emission. A clear increase in distance between the showers can be observed for heavier nuclei. The distribution of helium peaks at a distance of approximately 100 km , where the distribution for uranium peaks at approximately 10000 km .

Light nuclei (He, O) show no difference between both processes concerning the distance between the showers. For heavier nuclei however (Fe, U), a difference can be observed. For these elements, the distances between the showers are somewhat larger for proton emission than for neutron emission.

Orientation of the showers

The separation between the two showers is given by separation vector $\vec{\delta}$. The direction of this vector defines the orientation of the two showers relative to each other. In figure 14, this angle is plotted and it clearly shows that the distribution peaks sharply at an angle of 0 rad , meaning that the two showers have a strong preference to be separated in a north-south orientation. Using figure 6 and the formula for the Lorentz force $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$, this preference can easily be understood. Knowing that the particles have a positive charge, move in the ρ -direction of the used coordinate system and that the ϕ -component of the interplanetary magnetic field dominates (section 2.2.2), using the right-hand rule will show that the particles will be deflected in the z -direction. In this coordinate system, this direction is perpendicular to the ecliptic plane, therefore separating the two showers along the north-south line.

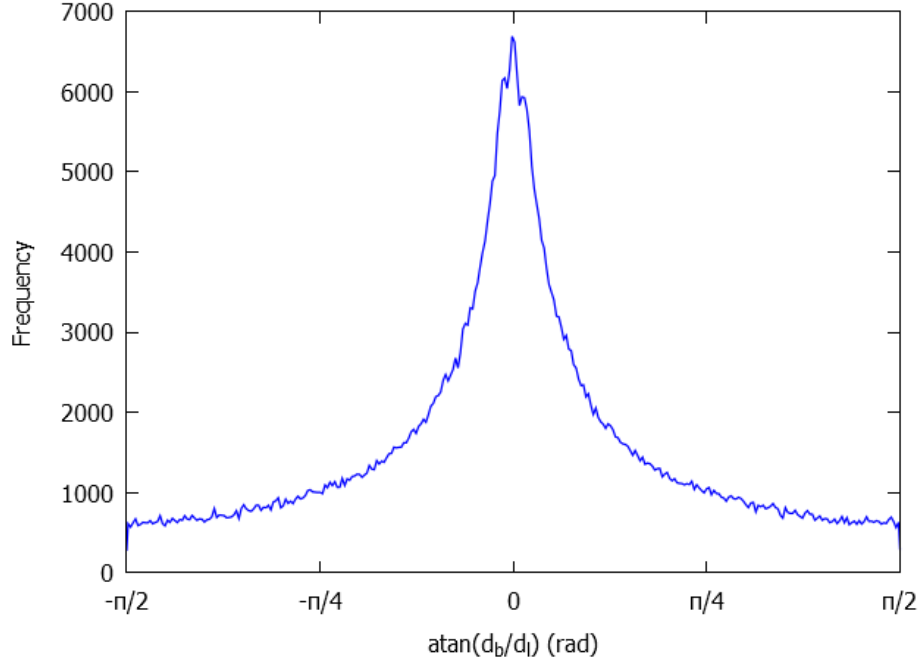


Figure 14: Orientation of the separation vector $\vec{\delta}$ between the two showers. An angle of 0 rad indicates that the showers are separated in a north-south orientation. An angle of $\pi/2 \text{ rad}$ thus corresponds to an east-west separation of the showers.

Day and night detection

Figure 15 shows a contourplot of the total intrinsic GZ-flux for different arrival directions of the cosmic ray showers. The color of each square is a measure for the flux of GZ-events coming from that direction. Every arrival direction is defined using the ϕ - and θ -angles, creating coordinates (ϕ, θ) . These angles are defined similar to the right ascension and declination angles which are used to define the positions of celestial objects. The only difference between these two coordinate systems is that the origin is defined differently. When using right ascension and declination, the coordinate $(0, 0)$ is defined as the position on the celestial sphere where the sun crosses the celestial equator from south to north at the March equinox. Right ascension increases when rotating in an eastward direction from the origin and the declination angle increases when moving north. from the origin. In the coordinate system that is being used in this report, the origin is defined in the direction of the sun. Because of the similarities with the right ascension and declination angles, the ϕ - and θ -angles in this report will carry the same names with ϕ being the right ascension angle and θ the declination angle.

As mentioned above, the coordinate $(0, 0)$ in the contourplot defines a particle shower coming from the direction of the sun. The coordinates $(\pi, 0)$ and $(-\pi, 0)$ are equivalent and define a shower coming from the direction facing away from the sun. These particle showers reach Earth during the night. If the sun is located directly above the equator, a shower coming in from directly above the North Pole will have the coordinate $(0, \pi/2)$. In fact, the GZ-flux for a shower coming from either of the poles is independent of the declination angle, since they all define the same point.

The contourplot shows that the flux around the coordinate $(0, 0)$ is very low, indicating that almost no particle showers are to be expected coming from the direction of the sun. This is because such particles are deflected too much to be detected on Earth: the separation between the showers is larger than the earth's diameter.

The parts with the highest GZ-flux seem to be formed by two half circles around the coordinates $(\pi, 0)$ and $(-\pi, 0)$. As was stated above, these coordinates define the same location in the sky which is located on the nightside of the earth, facing away from the sun. This means that the contourplot shows that the highest flux of GZ-events can be expected during the night.

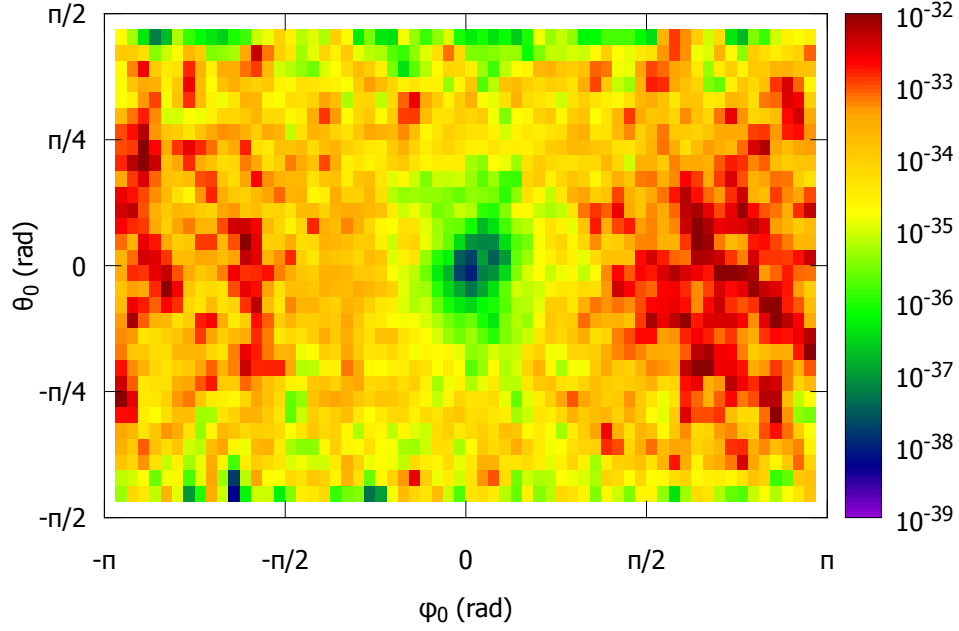


Figure 15: Contourplot in which each square represents the total intrinsic GZ-flux coming from a certain arrival direction. The unit of the GZ-flux is $[m^{-2}s^{-1}sr^{-1}eV^{-1}]$. The arrival direction is expressed in terms of the right ascension and declination angles (ϕ and θ). The coordinate $(0, 0)$ is defined as a shower coming from the direction of the sun.

5 CONCLUSION

From the results in the previous section, the following conclusions can be drawn:

The expected rate at which GZ-events with an energy higher than 10^{16} eV can be measured using the current network of HiSPARC detectors is approximately 10^{-4} yr^{-1} . This value is influenced by assumptions made in this simulation, which will be discussed in the next section. The low predicted detection rate makes that the HiSPARC network is not (yet) a good project to use for detecting GZ-events. However, at the moment there are no experiments that do have a high expected detection rate in which a GZ-event could be detected more than once a year.

The showers caused by heavy cosmic ray particles have a larger separation between them than the showers caused by lighter nuclei. For high mass particles, a difference can be observed in the separation of the showers between GZ-events with proton emission and GZ-events with neutron emission. The showers produced in the latter process are less separated than with proton emission.

The showers of GZ-events have a preference to separate relative to each other in a north-south orientation, which is caused by the dominating ϕ -component of the interplanetary magnetic field.

The highest flux of GZ-events can be expected during the night, when the incoming flux of GZ-events can approximately be a factor $10^5 - 10^6$ higher than during the day.

5.1 Discussion

As mentioned above in the conclusion, the expected detection rate of GZ-events is influenced by assumptions made in this simulation in order to simplify reality. The expected influence of these assumptions is discussed in this section.

The simplification with the greatest consequence is probably that in this simulation the core of the first of the two showers is always located at the exact location of a HiSPARC station. For the second shower, the width of the shower was used to determine whether this shower could be detected as well. This showed that an extensive air shower can still be detected when its core is located a few hundred meters away from the HiSPARC station (depending on the shower's energy). Of course, the same holds for the first shower. Taking this into account in the simulation would result in a higher expected detection rate of GZ-events, because the location of the first shower would be less strict. However, due to limited time, this was not included in this thesis. In order to determine the flux of the first shower, the simulation uses the area of circles around 95 of the 97 stations (to compensate for overlapping circles) as the total area of the HiSPARC network. The radius of these circles is determined in the same way as was discussed in section 3.2.

Furthermore, when the probability of measuring the second shower in an event is calculated, we assume that both showers have roughly the same size. However, for high energies and heavy nuclei the shower caused by the proton or neutron can be two orders of magnitude smaller than the shower caused by the other fragment. These smaller showers lead to a smaller area around which the second shower can be detected with a 50 % probability. This simplification of the simulation probably causes the detection rate to further decrease.

The simulation performed in this thesis does not take the time dependency of the interplanetary magnetic field into account. The magnetic field caused by the sun has an 11-year cycle. Two of the components change their sign during this cycle, but this process does not happen abruptly. This simulation treats the interplanetary magnetic field as a fixed quantity. By not considering the time dependency of the interplanetary magnetic field, the simulation of the particles' trajectories is not completely realistic.

It was mentioned in section 3.1 that particles were uniformly generated with energies between 10^{16} and 10^{20} eV. Also the atomic numbers of these particles were uniformly chosen in the interval $2 \leq Z \leq 92$. Both these choices are not realistic and however this was corrected for afterwards by the simulation, it would have been better to implement the abundances of certain atomic numbers and energies before generating the GZ-events. This would have resulted in a more realistic set of particles, which would presumably also have led to a more accurate analysis.

HiSPARC is an outreach project which brings both advantages and disadvantages. A disadvantage of HiSPARC as opposed to for example the Pierre Auger observatory is that the detectors are not always managed by scientists. By allowing secondary school students and their teachers to work on these detectors and use them, the detectors may not be set-up optimally. The students and teachers are not experts on detector physics and may cause problems by changing their position or the settings. With the relatively low number of detector stations, this may lead to inferior results than are potentially possible.

In order to confirm a GZ-event one has to detect both of the showers at practically the same time. However, the possibility for two unrelated showers to be detected at practically the same time by two different stations is expected to be much larger than the expected detection rate of GZ-events. This makes it very difficult to filter these "random" events from the actual data.

Recommendations

At this time, the HiSPARC network consists of 108 detector stations of which the most are located in the Netherlands. Figure 13 has shown that the separation between the two showers in a GZ-event is usually between 1000 and 10000 *km*. At the same time, figure 18 in appendix A shows that the distances between HiSPARC stations mainly have values around 100 *km* and 500 *km*. The largest distance between two HiSPARC locations is currently 989 *km*. This means that HiSPARC, at this moment, is unable to detect most of the incoming GZ-events because of a lack of detectors separated by a large enough distance.

Furthermore, the results from figure 14 have shown that the two showers have a strong preference to separate in a north-south orientation. When looking at a map containing the current detector locations of HiSPARC (figure 9), one notices that the largest north-south separation between two stations is approximately 300 *km*. The HiSPARC stations that are separated by the largest distances are more east-west separated than north-south.

If HiSPARC chooses to focus on confirming a GZ-event, I recommend to start building stations that are either directly north or directly south of the Netherlands. Since the North Sea is located to the north, the easiest solution is to go the other way and build HiSPARC stations at locations more than 500 *km* south of the Netherlands. A look at a world map shows that Geneva in Switzerland (~ 680 *km*), Marseille in France (~ 1000 *km*) and Barcelona in Spain (~ 1200 *km*) are located roughly directly to the south of the Netherlands. By placing HiSPARC detectors in these cities, the detection rate of GZ-events is expected to increase.

6 BIBLIOGRAPHY

1. Carlson, P. & De Angelis, A. - Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays. *The European Physical Journal* H35, (2011), 309-329, ISSN: 2102-6459.
2. Gerasimova, N. & Zatsepin, G. *Journal of Experimental and Theoretical Physics* 11, (1960), 899.
3. de Coulomb, C.A. - Troisième mémoire sur l'Electricité et le Magnétisme. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, (1785), 612-638.
4. Röntgen, W. - Über eine Art von Strahlen. *Sitzungsberichten der Würzburger Physik-med* 132, (1895).
5. Becquerel, H. - Emission de radiations nouvelles par l'uranium metalique. *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences* 122, (1896), 1086.
6. Kurz, K. - The radioactive materials of the earth and air as the origin of the invasive radiation in the atmosphere. *Phys. Zeit.* 10, (1909), 834-845.
7. Pacini, D. - La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque. *Nuovo Cim* VI/3, (1912), 93.
8. Fokkema, D.B.R.A. - *The HiSPARC Experiment: data acquisition and reconstruction of shower direction* (2012), doi:10.3990/1.9789036534383. ISBN: 978-90-365-3438-3.
9. Grupen, C. - *Astroparticle Physics* (2005). ISBN: 9783540253129.
10. Lodders, K., Palme, H. & Gail, H.-P. in *Landolt-Börnstein - Group VI Astronomy and Astrophysics Numerical Data and Functional Relationships*, Science and Technology, (2009), Vol. 4B: solar System. (ed J.E. Trümper). 44-+. doi:10.1007/978-3-540-88055-4_34. arXiv:0901.1149 [astro-ph.EP]
11. George, J., Lave, K., Wiedenbeck, M. et al. - Elemental Composition and Energy Spectra of Galactic Cosmic Rays During Solar Cycle 23. *The Astrophysical Journal* No. 698, (2009), 1666-1681.
12. Wang, J.Z., Seo, E.S. et al. - Measurement of Cosmic-Ray Hydrogen and Helium and Their Isotopic Composition with the BESS Experiment. *The Astrophysical Journal* No. 564, (2002), 244.
13. Cronin, J., Swordy, S. & Gassier, T. - Cosmic rays at the energy frontier. *Scientific American* 276, (1997), 32-37.
14. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/synchrotron.html> (16 July 2013)
15. Epele, L.N., Mollerach, S. & Roulet, E - On the disintegration of cosmic ray nuclei by solar photons. *Journal of High Energy Physics* No. 3, (1999), 17. doi:10.1088/1126-6708/1999/03/017.
16. Fujiwara, Y., Iyono, A. et al. - Search for simultaneous parallel EAS events in long baseline EAS arrays with LAAS. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* No. 151, (2006), 481-484. doi:10.1016/j.nuclphysbps.2005.07.084.
17. Medina-Tanco, G.A., & Watson, A.A. - The photodisintegration of cosmic ray nuclei by solar photons: the Gerasimova-Zatsepin effect revisited. *Astroparticle Physics* No. 10, (1999), 157-164. doi:10.1016/S0927-6505(98)00056-5.
18. Akasofu, S.I., Gray, P.C. & Lee, L.C.. - A Model of the heliospheric magnetic field configuration. *Planetary and Space Science* Vol. 28, No. 6. (1980), 609-615. doi:10.1016/0032-0633(80)90007-0.
19. Osinga, G. - Modeling the propagation of ultra-high energy cosmic rays inside the Solar System: visualization of the Gerasimova-Zatsepin effect, (2013).

20. Lafèbre, S., Falcke, H. et al. - Prospects for direct cosmic ray mass measurements through the Gerasimova-Zatsepin effect. *Astronomy and Astrophysics* Vol. 485. (2008) 1-4. doi:10.1051/0004-6361:200809468.
21. http://data.hisparc.nl/show/stations_on_map/ (26 August 2013)
22. <http://www.openstreetmap.org/> (26 August 2013)
23. http://data.HiSPARC.nl/show/stations_by_country/ (10 July 2013).
24. <http://www.HiSPARC.nl/en/downloads/manuals/detector-installation/position/> (29 August 2013)
25. Knoll, G.F. - *Radiation detection and measurement*, (1979), ISBN: 978-0470131480
26. <http://my.et-enterprises.com/pdf/9107B.pdf> (17 July 2013)
27. Hörandel, J. - On the knee in the energy spectrum of cosmic rays. *Astroparticle Physics*, 19, (2003), 193. arXiv:astro-ph/0210453
28. <http://www.HiSPARC.nl/docent-student/lesmateriaal/onderbouw/> (18 July 2013)

A APPENDIX: SIMULATION PLOTS

The plots in figures 16 and 17 show the three components of the interplanetary magnetic field for $z = 0.01 \text{ AU}$ and $z = 1 \text{ AU}$ respectively (z is the distance from the ecliptic plane as defined in figure 6 on page 20). These plots show the same trend as figure 8 on page 22 ($z = 0.1 \text{ AU}$), with the ϕ -component dominating over the z - and ρ -components for $r > 1 \text{ AU}$.

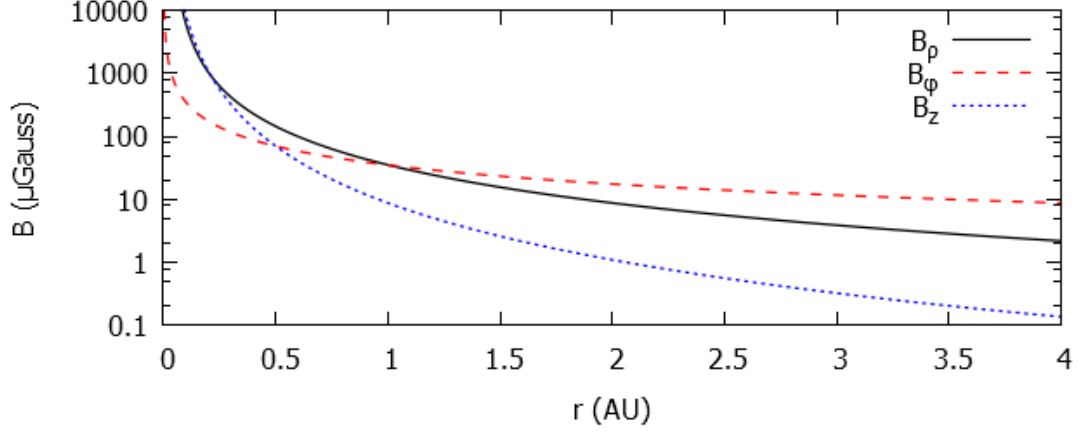


Figure 16: ϕ -, ρ - and z -components of the total magnetic field for $z = 0.01 \text{ AU}$. r is the distance from the sun. The z - and ρ -component lines have a minus-sign.

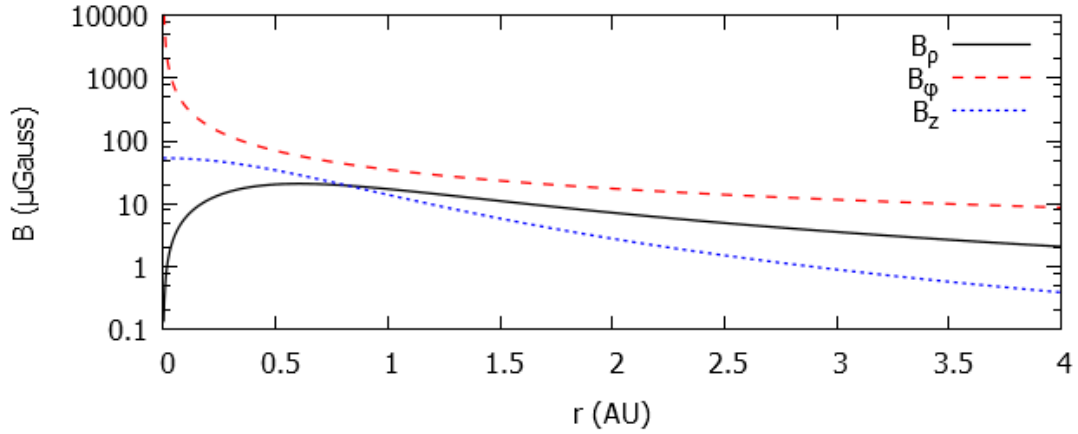


Figure 17: ϕ -, ρ - and z -components of the total magnetic field for $z = 1 \text{ AU}$. r is the distance from the sun. The z - and ρ -component lines have a minus-sign.

Figure 18 shows the mutual distances between all HiSPARC stations that were used in this simulation. It can be observed that the majority of the mutual distances are smaller than $\sim 200 \text{ km}$ which is the maximum distance between stations within the Netherlands. The mutual distances larger than this are caused by the few stations located in the United Kingdom and Denmark.

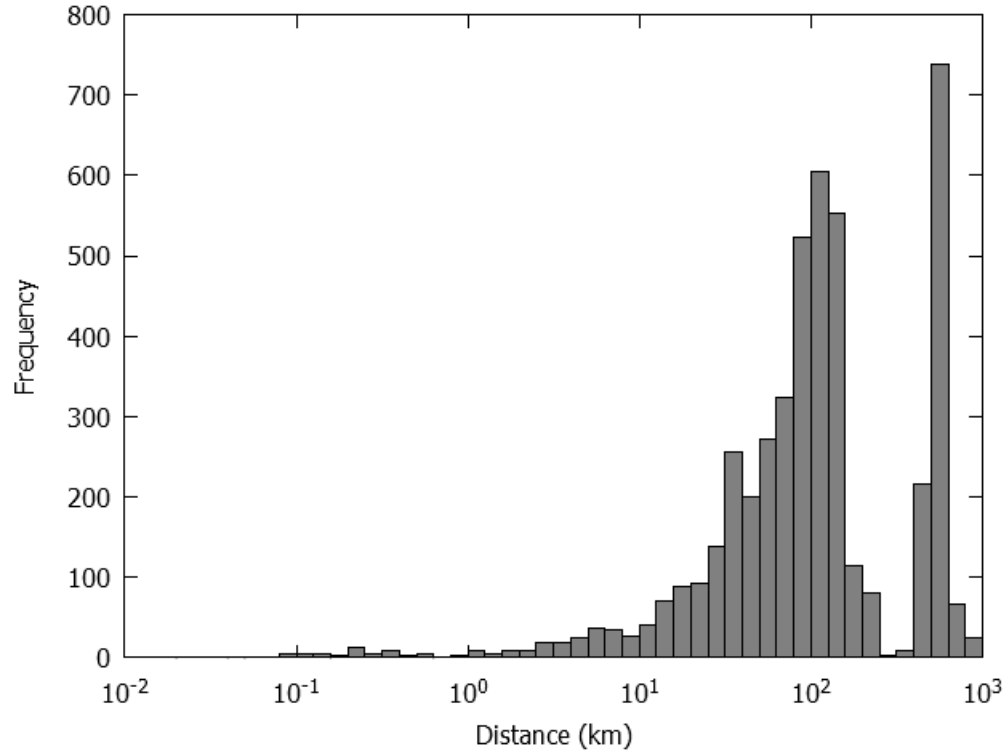


Figure 18: Distances between HiSPARC stations.

B APPENDIX: LEARNING MODULE 'COSMIC RAYS'

Section 2.3 shortly mentioned the collaboration of HiSPARC with secondary school students. Students who are in their last year of their education at such schools have to perform some research of their own and write a report about it. This research is mandatory for all students in order for them to graduate. HiSPARC offers a project for these students where they can build their own HiSPARC station which is placed on their school's rooftop. The students are invited to one of the locations from which HiSPARC works (for example Nikhef in Amsterdam) where they help assemble the scintillator detector. Subsequently, the students help to actually place the detectors on the rooftop of their school building. As soon as the station is placed, the students can use the data from their own station and analyze it using the software on HiSPARC's website.

The students who participate in such projects are usually around 17 or 18 years old. However, HiSPARC wants to get the students excited for this type of research at a younger age. In order to do that, a learning module is created which aims at secondary school students of 13 to 15 years old. The module's title is "Cosmic rays" and it is built up much like an ordinary chapter of a physics book containing theory, exercises and practical assignments. The module can be taught at school for a period of approximately 8 weeks. The learning module contains a variety of subjects like electrical charge, electroscopes, electromagnetic radiation, radioactivity, the atom structure and the powers of ten.

The module is built around the history of how cosmic rays were discovered and how their nature was determined. The scientists who played a role in this process and the experiments they performed are discussed. The variety in subjects seems like too much for the students to process in such a short time, but the goal of this module is not for the students to be able to use all the presented information. It aims to let the students experience how scientists discover a new phenomenon and how they explore it. The module is also used to spark the students' interest in this field of research, hoping to motivate them to continue this work in later years.

The learning module is available for everyone to use and download at the website of HiSPARC [28]. Teachers can obtain a solutions manual for the exercises by sending an e-mail to the address provided on this webpage.

KOSMISCHE STRALING



LESMODULE HiSPARC VOOR TWEEDE KLAS HAVO/VWO

Jeffrey Wouda

Bas de Gier



1.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk 'Kosmische straling' ga je stap voor stap de geschiedenis doorlopen die heeft geleid tot de ontdekking van deze straling. Het woord *kosmisch* betekent letterlijk 'het heelal betreffend'. Het gaat dus om straling die uit het heelal afkomstig is.

In de wetenschap begint een nieuwe ontdekking (bijna) altijd met een wetenschapper die iets waarneemt wat hij niet kan verklaren. Hierna worden er dan allerlei experimenten gedaan om uiteindelijk tot een verklaring te komen: een theorie. De periode tussen de eerste waarneming en de uiteindelijke theorie is soms tientallen jaren. Bij de ontdekking van kosmische straling is dit niet anders, want het speelt zich grofweg af tussen 1785 en 1914.

In iedere paragraaf staat een aantal onderstreepte woorden. Dit zijn de belangrijkste begrippen en de betekenis ervan moet je kennen. Daarnaast staan aan het eind van elke paragraaf een aantal opdrachten waarmee je kunt oefenen.

Hieronder zie je een aantal van de wetenschappers die hebben meegeholpen bij de ontdekking van kosmische straling. In de komende paragrafen worden de ontdekkingen van elk van hen besproken.



Van linksboven, met de klok mee: Charles-Augustin de Coulomb, Pierre Curie, Domenico Pacini, Wilhelm Röntgen, Theodor Wulf, Ernest Rutherford, Antoine Henri Becquerel en Marie Curie.

1.2 DE ELEKTROSCOOP

Bij bijna alle experimenten die hebben geleid tot de ontdekking van kosmische straling is gebruik gemaakt van één bepaald soort meetinstrument: de elektroscop. In deze paragraaf leer je hoe zo'n elektroscop werkt en wat je ermee kunt meten. Daarnaast leer je het begrip 'elektrische lading' kennen en maak je je eigen elektroscop.

1.2.1 ELEKTRISCHE LADING

Voorwerpen kunnen elektrisch geladen zijn. Een voorwerp dat elektrisch geladen is kan andere elektrisch geladen voorwerpen aantrekken of juist afstoten. Of de voorwerpen elkaar aantrekken of afstoten hangt af van welke lading de voorwerpen hebben. Er bestaan namelijk twee soorten elektrische lading: positieve en negatieve. Als een voorwerp een positieve elektrische lading heeft bevat het meer positief geladen deeltjes dan negatief geladen deeltjes. Andersom geldt hetzelfde: een negatief geladen voorwerp bestaat uit meer negatief geladen deeltjes dan positief geladen deeltjes.

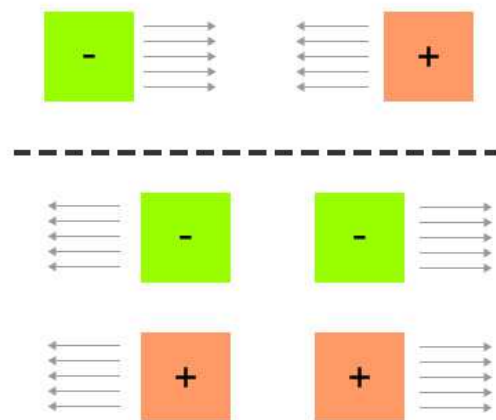
Wanneer een voorwerp evenveel positief als negatief geladen deeltjes bevat noem je dat voorwerp neutraal. Zo'n voorwerp bestaat wel uit elektrisch geladen deeltjes, maar het totale voorwerp is dan niet elektrisch geladen.

Zoals hierboven al werd genoemd kunnen elektrisch geladen voorwerpen elkaar aantrekken of afstoten, afhankelijk van hun lading. Er geldt dat voorwerpen met dezelfde elektrische lading elkaar afstoten en dat tegengesteld geladen voorwerpen elkaar aantrekken. In Figuur 1 staat dit kort samengevat.

- ♦ positief + negatief = aantrekken
- ♦ positief + positief = afstoten
- ♦ negatief + negatief = afstoten

Naast de voorbeelden in Figuur 1 wordt een neutraal voorwerp aangetrokken door een geladen voorwerp (positief én negatief).

- ♦ neutraal + positief = aantrekken
- ♦ neutraal + negatief = aantrekken



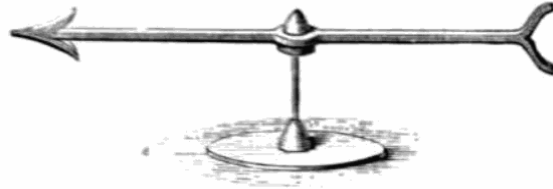
Figuur 1: Aantrekken (boven) of afstoten (onder)

Als een voorwerp elektrisch geladen is blijft dat zo totdat het voorwerp kan ontladen. Dit ontladen kan bijvoorbeeld door het voorwerp in contact te brengen met de aarde. Als dit gebeurt zullen de geladen deeltjes van het voorwerp stromen. De lading zal zich dan verdelen tussen de aarde en het voorwerp. Na het ontladen zijn zowel de aarde als het voorwerp neutraal geladen.

Een andere manier om een voorwerp te ontladen is door het aan te raken. De elektrische lading beweegt dan door je lichaam en je voelt een schok(je). Als er een grote elektrische lading op het voorwerp staat is die schok heel gevaarlijk en je kunt er zelfs aan doodgaan!

1.2.2 DRIE SOORTEN ELEKTROSCOPEN

Een elektroscoop is het oudste elektrische meetinstrument. Het is een apparaat dat wordt gebruikt om de aanwezigheid (en soms ook grootte) van elektrische lading te laten zien. De eerste elektroscoop werd rond 1600 gemaakt door de Britse natuurkundige William Gilbert. Hij noemde zijn elektroscoop 'Versorium'.



Figuur 2: De Versorium

In Figuur 2 zie je een afbeelding van deze eerste versie van een elektroscoop. De naald van de Versorium kan vrij ronddraaien op het pootje eronder en lijkt wel wat op een kompasnaald. Als je een elektrisch geladen voorwerp dichtbij houdt zal de wijzer naar het voorwerp wijzen. Dit komt doordat de 'neutraal geladen' naald wordt aangetrokken door de lading (positief of negatief) op het voorwerp.

Een elektroscoop is gemaakt van twee verschillende soorten materialen: geleidende en niet-geleidende. In geleidende materialen kan elektrische lading stromen, terwijl dat in niet-geleidende materialen niet mogelijk is. In de Versorium is de naald gemaakt van geleidend materiaal. De elektrische lading kan daardoor vrij door de naald bewegen en zo reageren op een lading die vlakbij wordt gehouden. De standaard waarop de naald draait is gemaakt van niet-geleidend materiaal zodat de lading niet kan "ontsnappen" naar de aarde.

Na deze eerste versie van een elektroscoop zijn er allerlei andere soorten elektroscopen gemaakt. Deze zijn in drie groepen te verdelen. Hieronder staat van elke groep een voorbeeld beschreven:

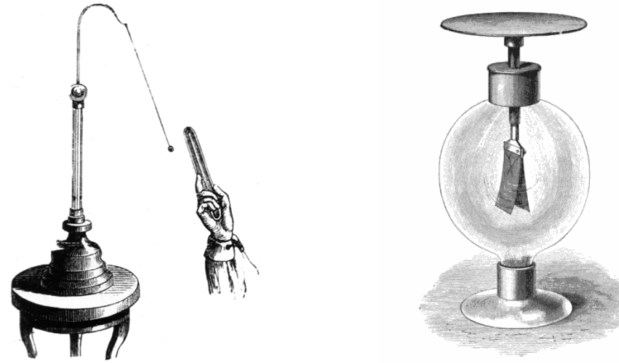
- ♦ **MERGBAL ELEKTROSCOOP**

De mergbal elektroscoop (Figuur 3) werd in 1754 uitgevonden door de Engelsman John Canton. De elektroscoop bestaat uit een standaard van niet-geleidend materiaal. Aan deze standaard hangt een zijden draad met aan het uiteinde een klein balletje. Als je een elektrisch geladen voorwerp dichtbij houdt zal het balletje aan de zijden draad naar het voorwerp toe bewegen. In de eerste versie van dit type elektroscoop was het balletje gemaakt van merg, een materiaal dat je kunt vinden in de stengels van vaatplanten. Tegenwoordig wordt in plaats hiervan vaak plastic gebruikt.

- ♦ **BLADGOUD ELEKTROSCOOP**

In 1787 werd de bladgoud elektroscoop (Figuur 3) uitgevonden door een Engelsman genaamd Abraham Bennet. Deze elektroscoop is een stuk gevoeliger dan de mergbal elektroscoop.

Een elektroscoop van dit type bestaat uit een verticale metalen staaf. Meestal is deze staaf van koper gemaakt. Aan de onderzijde van de koperstaaf hangen twee stukjes bladgoud. Omdat de stukjes bladgoud heel dun en licht zijn worden ze omsloten door een glazen stolp zodat ze niet gaan bewegen door luchtstromen. Aan de bovenzijde van de koperstaaf (buiten de stolp) wordt een schijf geplaatst. Wanneer je nu een elektrisch geladen voorwerp vlakbij deze schijf houdt zullen de stukjes bladgoud van elkaar af bewegen en een omgekeerde 'V' vormen (zie Figuur 3). In plaats van bladgoud kan er ook een ander metaal worden gebruikt.



Figuur 3: Mergbal elektroscop (links) en Bladgoud elektroscop (rechts)

♦ **SPIN ELEKTROSCOOP**

De spin elektroscop is de eenvoudigste van de drie verschillende types elektroscopen. De Versorium, die hierboven werd genoemd, is het bekendste voorbeeld. Een spin elektroscop bestaat altijd uit een naald van geleidend materiaal die vrij kan draaien. De naald zal zich altijd naar een elektrische lading toe bewegen.

Het is mogelijk om elektrische lading van een voorwerp over te brengen op een deel van de elektroscop. Bij een mergbal elektroscop kan je bijvoorbeeld het balletje een negatieve elektrische lading geven. Als er vervolgens een elektrisch geladen voorwerp bij wordt gehouden kan je ontdekken of dat voorwerp negatief of positief geladen is. Een positief geladen voorwerp zal het balletje namelijk aantrekken, terwijl een negatief geladen voorwerp het balletje zal afstoten.

Een elektroscop kan dus niet alleen gebruikt worden om de aanwezigheid van elektrische lading aan te tonen. Je kunt ook bepalen of zo'n voorwerp positief of negatief geladen is.

Vragen en opdrachten:

1. Noem drie voorbeelden van elektroscopen en beschrijf hun werking.
 2. Geef telkens aan of de deeltjes elkaar afstoten, aantrekken, of niets doen.
 - a. Positief + positief
 - b. Neutraal + negatief
 - c. Neutraal + neutraal
 - d. Positief + negatief
 3. Stel dat je een geladen voorwerp bij de Versorium houdt en de naald wijst naar het voorwerp. Is het voorwerp dan positief of negatief geladen? Of kan je dat niet weten? Leg je antwoord uit.
 4. In de tekst staat dat bij een bladgoud elektroscop de stukjes bladgoud elkaar afstoten wanneer je er een geladen voorwerp bij houdt. Wat weet je nu over de elektrische lading op de stukjes bladgoud?
 5. Bij een bladgoud elektroscop hoeft je niet per se stukjes bladgoud te gebruiken. Andere materialen hebben eenzelfde effect. Moet dit dan een geleidend materiaal zijn of juist niet? Leg je antwoord uit.
-

1.2.3 CHARLES-AUGUSTIN DE COULOMB

Charles-Augustin de Coulomb was een Franse natuurkundige die leefde tussen 1736 en 1806. Hij deed veel onderzoek naar elektrische ladingen en heeft daarmee voor belangrijke ontdekkingen gezorgd. De Coulomb wist dat elektrisch geladen voorwerpen elkaar aantrekken en afstoten, maar hij ontdekte bovendien een manier om uit te rekenen hoe groot de kracht tussen twee elektrisch geladen voorwerpen is. Dit is later de 'wet van Coulomb' genoemd. Onder andere vanwege deze ontdekking is de eenheid van elektrische lading naar De Coulomb vernoemd. Net zoals je lengte meet in de eenheid 'meter' en massa in de eenheid 'kilogram' wordt elektrische lading gemeten in 'coulomb'.



Figuur 4: Charles-Augustin de Coulomb

In het jaar 1785 deed De Coulomb een experiment met de elektroscoop. Voor dit experiment bracht hij elektrische lading aan op de elektroscoop. Tijdens zijn onderzoek merkte De Coulomb dat de elektroscoop langzaam ontladde; de lading die hij erop had aangebracht verdween. Dit gebeurde zonder dat hij de elektroscoop in contact bracht met de aarde of een ander voorwerp. De Coulomb kon niet verklaren waar dit ontladen door werd veroorzaakt. Blijkbaar gebeurde er iets in de lucht, dat ervoor zorgde dat de elektrische lading van de elektroscoop verdween, maar De Coulomb had geen idee wat dit was. Achteraf bleek deze ontdekking van De Coulomb de eerste waarneming van kosmische straling te zijn.

Vragen en opdrachten:

6. Leg uit wat er met de lading op een neutraal geladen bladgoud elektroscoop gebeurt wanneer je er een positief geladen voorwerp bij de bovenkant houdt. (*Hint: Wat gebeurt er met de positief en negatief geladen deeltjes op de elektroscoop?*)
 7. Bedenk waarom een bladgoud elektroscoop veel gevoeliger zal zijn dan bijvoorbeeld de Versorium of een mergbal elektroscoop. (*Hint: gebruik je antwoord bij vraag 4*)
-

1.2.4 PRACTICUM: ELEKTROSCOOP MAKEN

Hieronder staat een practicum waarin je je eigen bladgoud elektroscop gaat maken.

Doel van het practicum:

Een elektroscop maken en zijn werking testen.

Benodigdheden:

- ♦ Een glazen potje met plastic deksel
- ♦ Koperdraad
- ♦ Aluminiumfolie
- ♦ Een stuk plexiglas
- ♦ Een ballon



Wat moet je doen:

- Maak een gaatje in het midden van de deksel van het potje.
- Knip een stuk koperdraad van ongeveer 15 cm af.
- Steek het stuk koperdraad door het deksel heen.
- Buig aan beide uiteinden van het koperdraad een haakje.
- Maak aan de buitenkant van het deksel een prop aluminiumfolie om het koperdraad heen.
- Knip twee gelijke stukjes aluminiumfolie uit en hang ze samen aan het andere haakje dat je hebt gemaakt met het koperdraad.
- Draai de deksel op het potje.

Opdrachten:

Blaas de ballon op en houdt hem vlakbij de prop aluminiumfolie.

1. Beschrijf wat je ziet gebeuren in het potje.

Wrijf nu de ballon een tijdje over je haar of over een wollen trui. Houd de ballon weer bij het koperdraad.

2. Beschrijf opnieuw wat je ziet gebeuren in het potje.
3. Doe hetzelfde met het plexiglas. Beschrijf ook nu wat er gebeurt met de stukjes aluminiumfolie.

Als het goed is stootten de stukjes aluminiumfolie in het potje elkaar af.

4. Wat weet je nu over hun elektrische lading?
5. Hoe komt het dat de stukjes aluminiumfolie elektrisch geladen zijn?

1.3 ELEKTROMAGNETISCHE STRALING

Je weet nu wat een elektroscop is en hoe hij werkt. Een belangrijke vraag die nu nog overblijft, is de vraag die De Coulomb zichzelf stelde: waardoor kan een elektroscop spontaan ontladen? In deze paragraaf beginnen we met de zoektocht naar het antwoord op deze vraag en leer je over 'elektromagnetische straling'.

1.3.1 RÖNTGENSTRALING

Een belangrijke stap in de ontdekking waarom een elektroscop ontladt is de ontdekking van röntgenstraling. In 1895 begon Wilhelm Röntgen (Figuur 5), een Duitse natuurkundige, met een onderzoek naar hoe goed gassen elektriciteit kunnen geleiden bij een lage druk. Dit deed hij door een gloeidraad aan de ene kant van een glazen buis te plaatsen en een metalen plaatje aan de andere kant. Als de druk in deze glazen buis gelijk is aan de luchtdruk buiten gebeurt er niks, maar als de druk heel laag wordt gemaakt gebeurt er iets speciaals. In dat geval zorgen deeltjes in de gloeidraad ervoor dat het gas in de buis gaat oplichten.



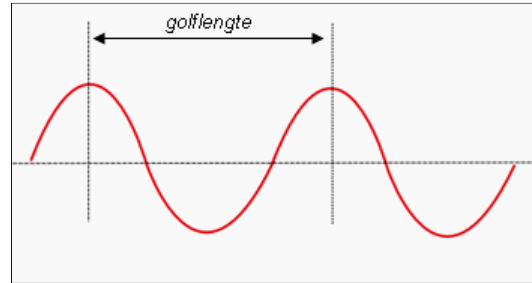
Figuur 5: Wilhelm Röntgen

Röntgen zag tot zijn verbazing dat wanneer hij de buis aanzette, er een fluorescerend scherm verderop in zijn lab oplichtte. Om er zeker van te zijn dat dit licht niet uit de buis kwam, maakte Röntgen zijn buis lichtdicht. Ondanks dat hij zijn buis omwikkelde met zwart karton, lichtte het scherm nog steeds op. Nadat Röntgen geen logische verklaring kon verzinnen voor dit verschijnsel concludeerde hij dat er een onbekende soort straling moest zijn en dat deze straling ervoor zorgde dat het scherm licht gaf. Hij noemde deze straling 'X-straling', omdat de 'X' bij wiskunde voor iets onbekends staat. Later is de naam van Röntgen aan deze straling gegeven en we noemen het daarom tegenwoordig "röntgenstraling". Röntgen kende het probleem dat De Coulomb had en hij dacht dat deze röntgenstraling misschien wel de oplossing daarvan was. Hij bedacht dat als deze straling ervoor kan zorgen dat een fluorescerende plaat licht gaat geven, het er misschien ook wel voor kan zorgen dat een elektrisch geladen elektroscop zijn lading verliest.

1.3.2 ELEKTROMAGNETISCHE STRALING

Iedereen heeft tegenwoordig wel eens van röntgenstraling gehoord en misschien heb je zelf wel eens een röntgenfoto laten maken in het ziekenhuis! Bij zo'n röntgenfoto wordt er een kleine hoeveelheid röntgenstraling door je lichaam geschoten en vervolgens kun je op een fotografische plaat de botten in je lichaam zien. Maar wat is deze röntgenstraling precies en wat is er zo speciaal aan?

Röntgenstraling is een vorm van golfstraling. Hiermee bedoelen we dat röntgenstraling bestaat uit golven. Deze golven kunnen we beschrijven met hun golflengte en/of frequentie, zoals je dat waarschijnlijk al eerder bij geluid hebt gezien. De golflengte (λ) van een golf is de lengte tussen twee golftoppen, ofwel de lengte van één golf. Je kunt dit goed zien in Figuur 6. De frequentie (f) is het aantal keren dat die golflengte wordt afgelegd in één seconde. Als een golf honderd keer per seconde op en neer gaat zeg je dat zijn frequentie 100 Hertz is. Hertz is de eenheid van frequentie en kan worden afgekort met Hz. De golflengte en frequentie zijn afhankelijk van elkaar. Hieronder staat de formule waarmee je de frequentie kunt berekenen als je de golflengte weet, en andersom:



Figuur 6: een golflengte

$$\text{frequentie} \times \text{golflengte} = \text{snelheid van het licht}$$

$$f \times \lambda = c$$

$$f \times \lambda = 300.000.000 \text{ m/s}$$

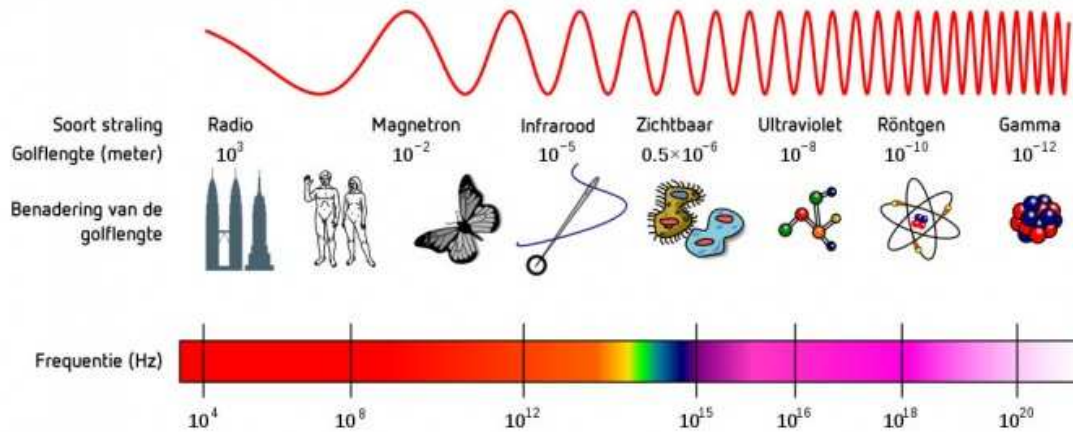
In deze formule staat de letter c voor de snelheid van het licht. Deze snelheid is altijd hetzelfde, namelijk 300 miljoen meter per seconde. Als je de golflengte en frequentie van een golf met elkaar vermenigvuldigt komt daar altijd deze lichtsnelheid uit.

Vragen en opdrachten:

8. Je kunt de bovenstaande formule omschrijven om de golflengte te berekenen. Dan krijg je $\lambda = c/f$. Schrijf nu de formule om zodat je de frequentie kunt uitrekenen.
9. Gebruik bij de volgende vragen telkens één van de bovenstaande formules.
 - a. Wat is de golflengte van de golf als zijn frequentie 200 Hz is?
 - b. Wat is de frequentie van de golf als zijn golflengte 0,3 m is?
10. Als de frequentie van een golf 30.000 Hz is, hoe lang duurt dan iedere trilling?
11. Een golf heeft een golflengte van 0,01 m.
 - a. Wat is de frequentie van de golf?
 - b. Hoe groot is de afstand die de golf aflegt in één seconde? (Hint: Wat is de golflengte en hoe vaak wordt die in één seconde afgelegd?).

Röntgenstraling bestaat uit zogeheten elektromagnetische golven en wordt daarom ook wel elektromagnetische straling genoemd. In Figuur 7 zie je dat er nog veel andere soorten elektromagnetische straling bestaan waarvan licht er één is. Samen worden alle soorten elektromagnetische straling het 'elektromagnetisch spectrum' genoemd.

Al deze elektromagnetische golven hebben met elkaar gemeen dat ze zich voortplanten met de snelheid van het licht. Eerder in deze paragraaf heb je al gezien dat deze lichtsnelheid 300 miljoen meter per seconde is. Dat betekent dat een deeltje dat met de lichtsnelheid beweegt elke seconde ongeveer 7,5 keer rond de aarde gaat!



Figuur 7: het elektromagnetisch spectrum

De frequentie en de golflengte van de straling (onderin Figuur 7) zijn het enige waarin de verschillende soorten elektromagnetische straling van elkaar verschillen.

Het spectrum begint links met de straling met de grootste golflengtes, radiogolven. Deze radiogolven hebben golflengtes van ongeveer duizend kilometer tot een millimeter. Als je verder naar rechts gaat, kijken we naar steeds kleinere golflengtes. Zo zie je microgolven (waar de magnetron mee werkt), infraroodgolven en uiteindelijk het zichtbare licht. Zichtbaar licht heeft een heel kleine golflengte, namelijk van 380 tot 780 nanometer. De golflengte van het licht bepaalt de kleur die je ziet. Een nanometer is een miljardste meter, enorm klein dus! De golflengte van licht is ongeveer zo groot als bacteriën. Röntgenstraling zit bijna helemaal rechts in het spectrum en heeft een nog veel kleinere golflengte, slechts een paar nanometer.

De grootte van de golflengte zegt ook iets over hoe gevaarlijk de straling kan zijn. Doordat röntgenstraling zo'n kleine golflengte heeft, hebben de golven enorm veel energie. Hierdoor kan röntgenstraling dwars door objecten heengaan, zoals door je lichaam tijdens een röntgenfoto. Dit is niet ongevaarlijk en daarom beschermen de doktoren in het ziekenhuis zich met een loodschort. Lood kan elektromagnetische straling namelijk heel goed tegenhouden.

Je ziet in het spectrum ook ultraviolette golven, ook wel UV-straling genoemd. Deze UV-straling heeft ook een kleine golflengte en is dus schadelijk voor je! UV-straling is dan ook de reden dat je huid verbrandt als je te lang in de zon hebt gezeten. Gelukkig kun je je hiervoor goed beschermen door je in te smeren met zonnebrand.

Radiogolven hebben zoals gezegd een lange golflengte. Dit betekent dat deze golven een veel lagere energie bezitten dan bijvoorbeeld röntgenstraling of UV-straling. Doordat ze zo'n lage energie hebben kunnen radiogolven worden gebruikt in alledaagse toepassingen zoals het uitzenden van signalen van mobiele telefoons en radio/tv.

Vragen en opdrachten:

12. Waarom dragen doktoren een loodschort als er een röntgenfoto wordt gemaakt en de patiënt niet?

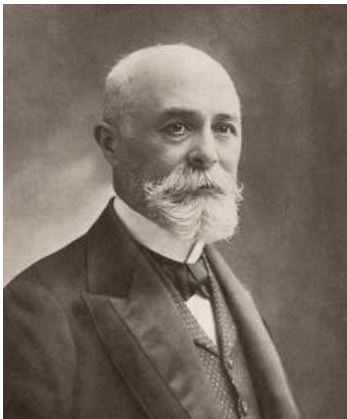
13. Waarom zou het gevaarlijk zijn als de signalen van mobiele telefoons met röntgenstraling zouden worden verzonden?
 14. Radio 538 zond voor het eerst uit op 11 december 1992. De radiofrequentie die zij gebruikten was 538 kHz (538.000 Hz).
 - a. Hoe groot is de golflengte van deze radiogolven? (rond af op een geheel getal)
 - b. Waar zal Radio 538 zijn naam vandaan hebben gehaald?
 15. Heeft infraroodstraling een langere golflengte dan zichtbaar licht of juist een kortere?
 16. De lichtsnelheid is 300 miljoen meter per seconde.
 - a. Wat is de lichtsnelheid in kilometer per uur?

De afstand tussen de aarde en de zon is 150 miljoen kilometer.

 - b. Hoeveel seconde doet het licht van de zon erover om op aarde te komen?
-

1.4 RADIOACTIVITEIT

In de vorige paragraaf heb je geleerd dat röntgenstraling misschien verantwoordelijk is voor het spontaan ontladen van de elektroscop. Die röntgenstraling kwam uit een buis met een gloeidraad erin. Er zijn echter ook natuurlijke stralingsbronnen die invloed kunnen hebben op het ontladen van de elektroscop, zogeheten radioactieve materialen. In deze paragraaf leer je over deze radioactieve materialen.



Figuur 8: Antoine Henri Becquerel

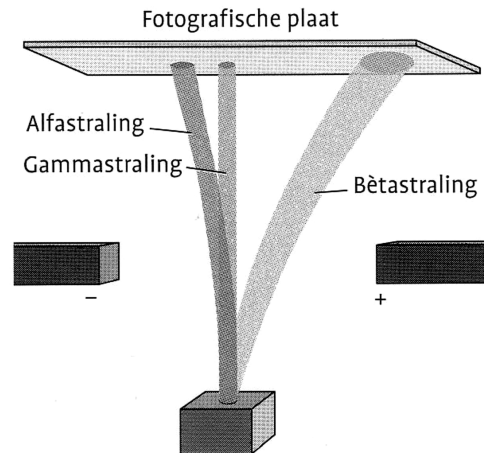
In 1896 deed de Franse natuurkundige Antoine Henri Becquerel een experiment waarbij hij gebruik maakte van de röntgenstraling die in de vorige paragraaf ter sprake is gekomen. Becquerel nam aan dat sommige materialen energie uit zonlicht kunnen absorberen en dit vervolgens weer kunnen uitzenden in de vorm van röntgenstraling. Hij wilde dit testen door een blok uraniumzout in het zonlicht te leggen en dit daarna bovenop een fotografische plaat te plaatsen. Becquerel verwachtte dat het uraniumzout als gevolg van het zonlicht röntgenstraling zou uitzenden die de fotografische plaat zwart zou kleuren. Deze verkleuring zag Becquerel inderdaad, maar hij ontdekte ook iets dat hij niet kon verklaren. Wanneer het uraniumzout niet aan zonlicht wordt blootgesteld, kleurt de fotografische plaat toch zwart. Blijkbaar wordt de straling dus niet veroorzaakt door het zonlicht, maar komt het uit het blok zelf. Latere experimenten bewezen dit.

Becquerel wilde deze straling beter onderzoeken en daarvoor plaatste hij een blok uraniumzout en een fotografische plaat in een magnetisch veld. Omdat bewegende elektrisch geladen deeltjes door een magneet worden afgebogen, kan je op deze manier zien welke elektrische lading de deeltjes in de onbekende straling bezitten.

In Figuur 9 zie je een voorstelling van wat Becquerel met deze opstelling zag. Hij zag op drie verschillende plaatsen op de fotografische plaat een zwarte verkleuring ontstaan. Een deel

van de straling wordt niet afgebogen door de magneet en beweegt rechtdoor. Deze straling wordt gammastraling genoemd. De andere twee soorten straling worden in tegengestelde richting afgebogen, wat erop wijst dat zij een tegengestelde elektrische lading hebben. Deze soorten straling worden alfastraling en bètastraling genoemd.

Het laatste wat je in Figuur 9 kunt zien is dat alfastraling veel minder wordt afgebogen dan bètastraling. Dit komt doordat de deeltjes in de twee soorten straling niet dezelfde massa hebben (zie opdracht 20).



Figuur 9: drie soorten straling

De Nieuw-Zeelandse natuur- en scheikundige Ernest Rutherford ging verder met het onderzoek van Becquerel en onderzocht het doordringend vermogen van de drie soorten straling. Hij hield verschillende materialen voor het blok uraniumzout en bekeek dan telkens aan de achterkant ervan hoe veel en welke straling hij nog kon meten. Hij ontdekte met dit onderzoek dat de positief geladen deeltjes (alfastraling) al door een paar centimeter lucht worden gestopt. De negatief geladen deeltjes (bètastraling) kunnen worden gestopt met een dun aluminium plaatje, maar de neutraal geladen deeltjes (gammastraling) worden zelfs niet door een dikke laag lood gestopt. Het doordringend vermogen van de gammastraling is dus heel groot terwijl die voor alfa- en bètastraling veel kleiner is.



Figuur 10: Ernest Rutherford

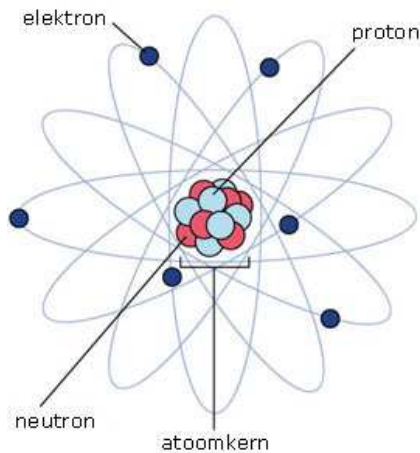
Om te kunnen begrijpen wat deze straling precies is moet je eerst iets weten over welke kleine deeltjes er bestaan.

1.4.1 HET ATOOM

De stoel waar je op zit, de lucht, dit blad, zelfs jijzelf en eigenlijk alle andere dingen om je heen zijn opgebouwd uit ontzettend kleine deeltjes. Deze deeltjes worden atomen genoemd en ze zijn veel te klein om met het blote oog nog te kunnen zien. Elk atoom is ongeveer een miljoen keer kleiner dan de dikte van een haar op je hoofd!

Toch weten we best veel over atomen en hoe ze in elkaar zitten. In deze paragraaf gaan we bekijken waaruit een atoom bestaat en hoe die er ongeveer uitziet.

Het bestaan van atomen is al honderden jaren bekend, maar hoe een atoom is opgebouwd werd pas in 1911 ontdekt door Ernest Rutherford, die al eerder in deze paragraaf werd genoemd. Hij gebruikte een radioactieve bron die alfastraling uitstraalt. Deze straling richtte hij op een stukje goudfolie. Rutherford zag dat ongeveer 99,99% van de alfastraling door de goudfolie heen schoot alsof de folie er niet was. Slechts een heel klein deel van de straling



Figuur 11: een atoom

(ongeveer 0,01%) 'botste' op de atomen in de folie. Op basis hiervan trok Rutherford de conclusie dat het atoom grotendeels leeg is.

In Figuur 11 zie je een afbeelding van hoe je een atoom kunt voorstellen. Er is een klein deel van het atoom waarin zich vrijwel alle massa van het atoom bevindt. Dit deel heet de atoomkern en is ongeveer tienduizend keer kleiner dan het gehele atoom. Deze atoomkern bestaat uit kleine deeltjes die protonen en neutronen worden genoemd. De rest van het atoom is dus bijna helemaal leeg en heet de elektronenwolk. In deze wolk draaien nóg kleinere deeltjes, elektronen, met een gigantische snelheid rond de atoomkern.

Sommige deeltjes in een atoom zijn elektrisch geladen.

Protonen hebben een positieve lading, neutronen

hebben geen lading en elektronen zijn negatief geladen. Deze elektronen zijn ook de deeltjes die een elektrische stroom veroorzaken in een geleidend materiaal. In een geleidend materiaal zijn het dus altijd de negatief geladen deeltjes die bewegen, niet de positieve.

Normaal gesproken zijn er precies evenveel protonen als elektronen aanwezig in een atoom zodat het gehele atoom elektrisch neutraal is. Op dit moment zijn er 118 verschillende atomen bekend. Het soort atoom wordt bepaald door het aantal protonen dat er in de atoomkern aanwezig is.

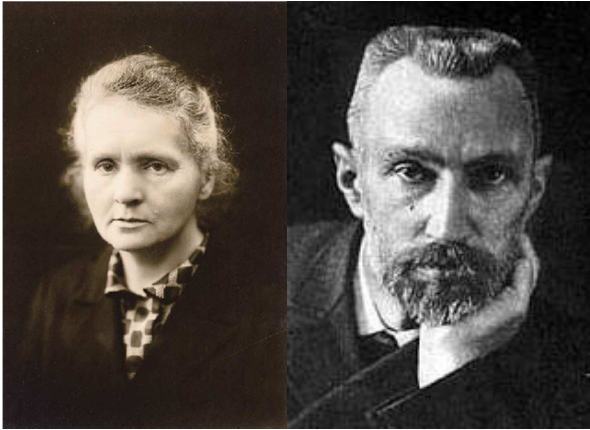
Het plaatje van het atoom (Figuur 11) is niet nauwkeurig. In werkelijkheid is de atoomkern namelijk vele malen kleiner dan het hele atoom. Om een voorstelling te maken: als de atoomkern inderdaad zo groot zou zijn als hier getekend is (ongeveer 1 cm), zou het totale atoom een diameter hebben van ongeveer 100 meter. De bewering van Rutherford is dus juist: een atoom is vrijwel leeg!

Nu weet je genoeg van de opbouw van atomen om te begrijpen waaruit de straling bestaat die Becquerel ontdekte. Alfastraling bestaat namelijk uit atoomkernen die bestaan uit twee protonen en twee neutronen. Deeltjes in alfastraling zijn dus eigenlijk atomen waaruit de elektronen zijn verdwenen. Bètastraling bestaat uit elektronen. Gammastraling is eigenlijk elektromagnetische straling met een frequentie die nog hoger is dan die van röntgenstraling.

1.4.2 RADIOACTIVITEIT

Uit verder onderzoek naar de resultaten van Becquerel bleek dat uranium-atomen in het uraniumzout de bron zijn van de verschillende soorten straling. Een uranium-atoom heeft 92 protonen in zijn atoomkern.

De Poolse natuurkundige Marie Curie en haar Franse echtgenoot Pierre Curie probeerden ook andere atoomsoorten te ontdekken die dezelfde straling uitzenden als uranium. Zij vonden nog twee atomen die inderdaad zulke straling uitzenden: polonium (84 protonen) en radium (88 protonen).



Figuur 12: Marie en Pierre Curie

Een andere ontdekking van Marie en Pierre Curie is dat een elektrisch geladen voorwerp, bijvoorbeeld een elektroscop, kan worden ontladen door de straling die wordt uitgezonden door het uranium, radium en polonium. Dit was dus een volgende mogelijke verklaring voor het spontaan ontladen van een elektrisch geladen elektroscop dat werd ontdekt door Charles-Augustin de Coulomb (paragraaf 1.2.2).

Marie en Pierre Curie noemden de stoffen die zulke straling uitzenden 'radioactieve stoffen'. Voor hun

onderzoek kregen zij samen met Becquerel de Nobelprijs voor natuurkunde in 1903. Daarnaast werd de eenheid van radioactiviteit vernoemd naar Becquerel. De radioactiviteit van een stof geeft aan hoe veel straling die stof per seconde uitzendt. Net zoals een afstand in de eenheid 'meters' wordt uitgedrukt wordt de radioactiviteit dus uitgedrukt in 'becquerel'.

Vragen en opdrachten:

17. Welke drie soorten straling onderscheidde Becquerel?
 18. Bepaal met behulp van Figuur 9 of alfastraling bestaat uit positief of negatief geladen deeltjes. Doe hetzelfde voor bètastraling. Leg je antwoord uit.
 19. Zet de volgende deeltjes in volgorde van klein naar groot: proton, atoom, elektron, atoomkern.
 20. Waar bevindt zich bijna alle massa in een atoom?
 21. Je ziet in Figuur 9 dat alfa- en bètastraling niet evenveel worden afgebogen door het magneetveld. Dit komt doordat de massa van de deeltjes niet gelijk is. Welke straling zal uit zwaardere deeltjes bestaan? Leg je antwoord uit.
 22. Welke straling is het schadelijkst voor de mens? (*Hint: denk aan het doordringend vermogen*).
-

Zoals hierboven al werd genoemd zijn atomen onvoorstelbaar klein. Je hebt ook geleerd dat protonen, neutronen en elektronen nóg veel kleiner zijn. Omdat dit allemaal nog maar moeilijk voor te stellen is gaan we in de volgende paragraaf kijken hoe klein deze deeltjes zijn door ze te vergelijken met voorwerpen die we ons wel kunnen voorstellen. We gaan dan ook kijken naar veel grotere voorwerpen en proberen te begrijpen hoe groot die dan zijn.

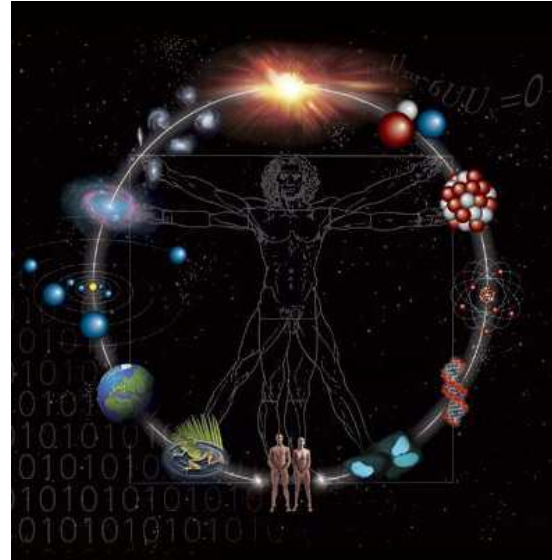
1.5 HEEL KLEIN EN HEEL GROOT

In de vorige paragraaf hebben we het gehad over het atoom. Daarbij bleek dat het heel moeilijk is om je nog te kunnen voorstellen hoe klein die deeltjes dan zijn. Om dit duidelijker te maken gaan we in deze paragraaf de groottes van deze kleine deeltjes vergelijken met die van dingen die we ons wel goed kunnen voorstellen. Daarnaast gaan we kijken naar objecten die juist onvoorstelbaar groot zijn. Ook die gaan we vergelijken met dingen die een 'normale' grootte hebben.

1.5.1 MACHTEN VAN TIEN

Als je gaat kijken naar steeds kleinere deeltjes worden de afmetingen al snel heel erg klein. Dan is het lastig om de grootte van zo'n klein deeltje nog duidelijk op te schrijven. Want als het ene deeltje een grootte heeft van 0,000000001 meter en een ander heeft een afmeting van 0,0000000001 meter, welke is dan groter? Hetzelfde geldt voor heel grote getallen. Is 10000000000 een groter getal dan 100000000000? Of juist kleiner? Er zit in beide gevallen niets anders op dan het aantal nullen te gaan tellen. Dit is niet erg handig en kost veel tijd om te doen. Daarom is een makkelijker manier afgesproken om zulke kleine en grote getallen op te schrijven: met behulp van de machten van tien.

Bij deze manier van opschrijven schrijf je het getal uit als macht van tien. Hieronder staan een aantal voorbeelden met nog redelijk kleine getallen:



Figuur 13: Van klein naar groot

10	= 10	= 10^1	= tien
100	= 10×10	= 10^2	= honderd
1000	= $10 \times 10 \times 10$	= 10^3	= duizend
10000	= $10 \times 10 \times 10 \times 10$	= 10^4	= tienduizend
100000	= $10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$	= 10^5	= honderdduizend
1000000	= $10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$	= 10^6	= één miljoen

Het kleine getalletje dat telkens boven de tien wordt geschreven heet de 'macht'. Je ziet dat het aangeeft hoe vaak je tien met tien moet vermenigvuldigen om een bepaald groter getal te krijgen. Je kunt zien dat de macht gelijk is aan het aantal nullen dat in het uitgeschreven getal staat.

Door grote getallen op deze manier te schrijven kan je dus in één oogopslag zien welke groter is. De twee grote getallen die aan het begin van 1.5.1 werden genoemd kan je met behulp van de machten van tien ook schrijven als 10^9 en 10^{10} . Als je ze zo opschrijft zie je direct dat het tweede getal tien keer groter is dan het eerste, want zijn macht is één hoger.

Voor kleine getallen gaat het uitschrijven in machten van tien anders. Hieronder staan weer een paar voorbeelden:

10	= 10				= 10^1
1	= $\frac{10}{10}$	= $\frac{10^1}{10^1}$			= 10^0
0,1	= $\frac{10}{10 \times 10}$	= $\frac{10^1}{10^2}$	= $\frac{1}{10}$	= $\frac{1}{10^1}$	= 10^{-1}
0,01	= $\frac{10}{10 \times 10 \times 10}$	= $\frac{10^1}{10^3}$	= $\frac{1}{100}$	= $\frac{1}{10^2}$	= 10^{-2}
0,001	= $\frac{10}{10 \times 10 \times 10 \times 10}$	= $\frac{10^1}{10^4}$	= $\frac{1}{1000}$	= $\frac{1}{10^3}$	= 10^{-3}

Je ziet nu dat de machten een minteken ervoor krijgen. De waarde van de macht kan je gemakkelijk bepalen door het aantal nullen dat je schrijft als je het getal uitschrijft te tellen. Als voorbeeld kan je kijken naar de onderste regel. Dat getal (0,001) schrijf je met drie nullen. De bijbehorende macht is daarom -3. Nu kan je het voorbeeld uit het begin van de paragraaf gemakkelijk oplossen met behulp van de machten van tien. Die getallen kan je namelijk schrijven als 10^{-9} en 10^{-10} . Je ziet direct dat het tweede getal meer nullen bevat en dus kleiner is.

Als je wilt weten hoe veel keer groter het ene getal is dan het andere, moet je de macht van het grootste getal van de macht van het kleinste getal aftrekken.

Voorbeeld: je hebt twee getallen, 10^{12} en 10^{-7} . Als je dan de bovenstaande regel toepast krijg je $12 - (-7) = 19$. Het eerste getal is dus 10^{19} keer groter dan het tweede getal.

Natuurlijk zijn niet alle getallen precies een meervoud van tien, bijvoorbeeld de getallen 2000 en 0,03. Deze getallen kan je echter ook schrijven als 2×1000 en $3 \times 0,01$. Die getallen kunnen we nu wel weer als machten van tien schrijven. 2000 wordt dan 2×10^3 en 0,03 is gelijk aan 3×10^{-2} .

Vragen en opdrachten:

23. Waarom is het zo handig om getallen als macht van tien op te schrijven?

24. Schrijf de volgende getallen als macht van tien.

- | | |
|------------|------------|
| a. 0,00001 | d. 1000000 |
| b. 0,01 | e. 10 |
| c. 1000 | f. 1 |

25. Schrijf de machten van tien uit als getallen.

- | | |
|-----------|--------------|
| a. 10^2 | c. 10^{-3} |
| b. 10^7 | d. 10^{-6} |

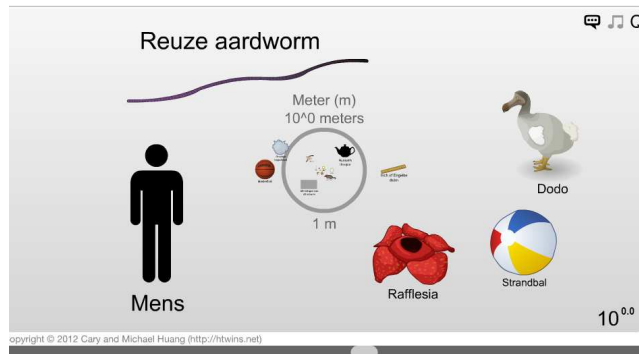
26. Schrijf de volgende getallen als macht van tien.

- | | |
|----------|-----------|
| a. 6000 | d. 0,1 |
| b. 0,003 | e. 1207 |
| c. 48000 | f. 0,0034 |

1.5.2 INTERNETOPDRACHT

Voor deze opdracht heb je een pc of laptop nodig.

- ♦ Open een webbrowser (bijvoorbeeld Google Chrome, Internet Explorer of Firefox) en typ in de adresbalk: <http://htwins.net/scale2/>
- ♦ Klik op 'Other Languages' en daarna op 'Nederlands'.
- ♦ Als de website is geladen, klik dan op 'Beginnen'. Je ziet nu op je scherm als het goed is hetzelfde als in Figuur 14.



Figuur 14: screenshot van de website

Op deze website kan je in- en uitzoomen op de wereld om ons heen. Als je de schuifbalk onderaan het scherm naar links beweegt komen er voorwerpen met een steeds kleinere afmeting in beeld. Als je de schuif naar rechts beweegt wordt de afmeting van de afgebeelde voorwerpen juist steeds groter. Rechtsonder in het scherm staat de grootte van de voorwerpen die op dat moment in het midden van het scherm staan, geschreven als macht van tien. Dat getal is uitgedrukt in meters.

Wanneer je op een plaatje klikt, komt er een schermpje met informatie over dat voorwerp. Hierin staat ook de afmeting van het voorwerp, geschreven als macht van tien en vaak ook als 'normaal' getal.

- ♦ Maak de onderstaande opdrachten. De antwoorden zijn op de website te vinden.
- ♦ Schrijf het antwoord telkens als een macht van tien.

Vragen en opdrachten:

27. Wat is de afmeting van de voorwerpen die in beeld staan wanneer je het programma opstart? (gebruik het getal dat rechtsonder in het scherm staat)
28. Zoom zo ver mogelijk uit. Wat is het grootste voorwerp in het programma en wat is de bijbehorende afmeting?
29. Wat is het kleinste voorwerp? En wat is de bijbehorende afmeting?
30. Hoe veel keer groter is het grootste voorwerp in het programma dan het kleinste voorwerp? Schrijf dit getal ook uit op de "normale" manier (zonder machten van tien).
31.
 - a. Hoe groot is een mier?
 - b. Hoe groot is een rode bloedcel?
 - c. Hoe veel keer groter is een mier dan een rode bloedcel?
32. Is de zon meer dan twintig keer zo groot als de aarde?

- 33.
- a. Welke afstand is groter? De afstand tussen de aarde en de maan of de afstand tussen de aarde en de zon?
 - b. Hoeveel keer groter is de afstand?
34. Het eenvoudigste atoom is het waterstofatoom. Het bestaat uit één proton in de atoomkern en één elektron in de elektronenwolk.
- a. Wat is de afmeting van een waterstofatoom?
 - b. Hoeveel keer kleiner is een waterstofatoom dan een mens?
- Stel je nu voor dat een waterstofatoom een afmeting heeft van 1 meter.
- c. Hoe groot is in deze situatie een mens?
 - d. Welk voorwerp is ongeveer net zo groot?
35. De atoomkern van het waterstofatoom bestaat uit één proton.
- a. Wat is de afmeting van een proton?
 - b. Hoeveel keer groter is het waterstofatoom dan een proton?
- Stel je nu voor dat een proton net zo groot is als een zoutkorreltje.
- c. Hoe groot is het waterstofatoom in deze situatie?
 - d. Welk voorwerp is ongeveer net zo groot?
36. Stel je de zon voor ter grootte van een strandbal.
- a. Hoe groot is de aarde dan?
 - b. Welk voorwerp kan je gebruiken om de aarde voor te stellen?
 - c. Wat is de afstand tussen de zon en de aarde op deze schaal?
-

1.6 KOSMISCHE STRALING

In de paragrafen hiervoor hebben we proberen te ontdekken hoe de elektroscop spontaan kan ontladen, iets wat Charles-Augustin de Coulomb (paragraaf 1.2) voor het eerst zag. Twee mogelijke oorzaken werden gegeven door Wilhelm Röntgen (röntgenstraling, paragraaf 1.3) en Antoine Henri Becquerel (radioactiviteit, paragraaf 1.4).

In deze paragraaf doorlopen we de rest van de geschiedenis tot en met de ontdekking van kosmische straling. Hierbij kijken we goed naar waarom de onderzoekers hun beslissingen maakten die zij maakten.

In de jaren na de ontdekking van röntgenstraling en radioactiviteit (na 1896) werd er door verschillende onderzoekers onderzocht of één van deze soorten straling verantwoordelijk is voor het spontaan ontladen van de elektroscop. Hieruit bleek dat de ontlading ook plaatsvindt als er geen röntgenstraling of radioactieve bron aanwezig is. De conclusie werd getrokken dat de lucht zélf een klein beetje straling bevat. Waar die straling dan vandaan komt was nog onbekend.

In 1909 werden er drie mogelijke bronnen van de onbekende straling genoemd:

- i. De straling komt uit de ruimte, mogelijk van de zon.
- ii. De straling komt uit de aardkorst.
- iii. De straling komt uit radioactiviteit in de atmosfeer.

In die tijd werd de tweede mogelijkheid gezien als de meest waarschijnlijke.



Figuur 15: Theodor Wulf

Om de hierboven genoemde aanname (dat de onbekende straling afkomstig is uit de aardkorst) te testen deed de Duitse wetenschapper Theodor Wulf onderzoek naar de hoeveelheid straling onderaan en bovenaan de Eiffeltoren (324 meter). Als de straling afkomstig zou zijn uit de aardkorst zou je verwachten dat je bovenop de Eiffeltoren minder straling meet dan op de begane grond. Een deel van de straling wordt namelijk tegen gehouden door de lucht.

Wulf mat inderdaad dat er bovenop de Eiffeltoren 50% minder straling wordt gemeten dan op de begane grond. Er werd echter voorspeld dat er op die hoogte nog maar een paar procent kon worden gemeten. Toch leek de aanname dat de onbekende straling uit de aardkorst afkomstig is nog steeds de beste.

Vragen en opdrachten:

37. Waarom werd verwacht dat de intensiteit van de straling bovenop de Eiffeltoren lager is dan op de grond?
-

Tussen 1907 en 1912 deed de Italiaan Domenico Pacini zijn eigen onderzoek naar de bron van de onbekende straling. Hij deed daarvoor metingen op het land en op zee. Pacini bedacht dat als de straling afkomstig is uit de aardkorst, de gemeten hoeveelheid straling op zee een stuk lager zou moeten zijn dan de hoeveelheid straling op het land. Dit komt doordat het zeewater, net als de lucht in het experiment van Wulf, een deel van de straling zal absorberen voordat het kan worden gemeten. Uit de metingen van Pacini bleek dat de intensiteit van de straling op zee echter hetzelfde is als op het land.

Om een nog duidelijker conclusie te kunnen trekken deed Pacini hierna nog onderzoek naar de intensiteit van de straling op drie meter onder het zeeniveau. Hier mat hij een afname van 20% in de intensiteit. Zijn conclusie luidde daarom dat de onbekende straling niet uit de aardkorst maar juist van boven afkomstig is.



Figuur 16: Domenico Pacini

Tussen 1911 en 1914 werd de conclusie van Pacini verder onderzocht door onder andere de Oostenrijker Victor Hess en de Duitser Werner Kolhörster. Zij onderzochten de intensiteit van de straling op hoogtes tot 9200 meter door hun meetapparatuur mee te nemen in luchtballonnen. De resultaten die zij vonden waren in overeenstemming met de conclusies van Pacini.

Op de eerste paar honderd meter boven de grond wordt de intensiteit van de straling iets lager (net als Wulf mat op de Eiffeltoren). Op grotere hoogten neemt de intensiteit van de straling weer toe en op ongeveer 5200 meter hoogte is de intensiteit gelijk aan die op de grond. Hierboven neemt de intensiteit snel toe en op een hoogte van 9200 meter is de intensiteit ongeveer tien keer groter dan op het aardoppervlak.

De conclusie van Hess en Kolhörster luidde dat de straling van buiten de aarde afkomstig moet zijn.

Vanaf dit moment werd de naam 'kosmische straling' gebruikt om de onbekende straling aan te geven, wat letterlijk 'straling uit het heelal' betekent.

Uit latere experimenten bleek nog dat de meeste deeltjes in kosmische straling protonen en atoomkernen van atomen zijn. De kosmische straling bestaat dus vooral uit positief geladen deeltjes.

Vragen en opdrachten:

38. Waarom werd verwacht dat de intensiteit van de straling op zee lager zou zijn dan op het land?
 39. De kosmische straling bestaat vooral uit protonen en atoomkernen. Hebben de deeltjes in kosmische straling dus een positieve of een negatieve elektrische lading?
 40. Teken een grafiek van de intensiteit van de straling. Zet op de horizontale as de hoogte boven het aardoppervlak en op de verticale as de intensiteit.
 41. Maak een lijst van alle wetenschappers die in dit hoofdstuk zijn genoemd en zet erbij wat ze hebben bijgedragen aan de ontdekking van kosmische straling.
-

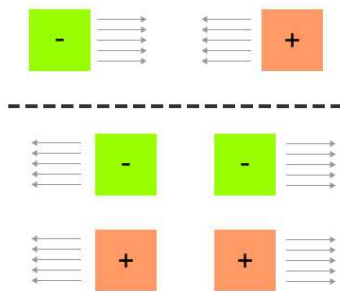
1.7 AFSLUITING

In de voorgaande paragrafen heb je geleerd wat kosmische straling is en hoe het is ontdekt. In deze laatste paragraaf wordt het hele hoofdstuk nog eens kort samengevat. De belangrijkste begrippen staan op een rij met daarbij hun betekenis.

1.7.1 BEGRIPPENLIJST

- ♦ **ALFASTRALING** - Straling met een positieve elektrische lading en een laag doordringend vermogen.
- ♦ **ATOOM** - Een heel klein deeltje waaruit alles is opgebouwd.
- ♦ **ATOOMKERN** - Centrum van het atoom waarin zich bijna alles bevindt.
- ♦ **BËASTRALING** - Straling met een negatieve elektrische lading en een groot doordringend vermogen.
- ♦ **DOORDRINGEND VERMOGEN** - Een maat voor hoe ver straling in een stof kan doordringen.
- ♦ **ELEKTRISCH GELADEN** - Een voorwerp dat niet evenveel negatief als positief geladen deeltjes heeft.
- ♦ **ELEKTROMAGNETISCH SPECTRUM** - Alle soorten elektromagnetische straling, bijvoorbeeld licht, röntgenstraling en radiogolven.
- ♦ **ELEKTRON** - Een klein, negatief geladen deeltje dat om de atoomkern heen cirkelt.
- ♦ **ELEKTROSCOOP** - Een meetinstrument dat de aanwezigheid (en soms grootte) van elektrische lading kan meten.
- ♦ **FREQUENTIE** - Het aantal trillingen per seconde.
- ♦ **GAMMASTRALING** - Straling met een hoog doordringend vermogen.
- ♦ **GELEIDEND MATERIAAL** – Materiaal waarin de elektrische lading vrij kan bewegen.
- ♦ **GOLFLENGTE** - De lengte tussen twee golftoppen.
- ♦ **NEUTRAAL** - Een voorwerp met evenveel positief als negatief geladen deeltjes.
- ♦ **NEUTRON** - Een klein, neutraal deeltje dat zich in de atoomkern bevindt.
- ♦ **NIET-GELEIDEND MATERIAAL** – Materiaal waarin de elektrische lading niet vrij kan bewegen.
- ♦ **ONTLADEN** - Elektrische lading van een elektrisch geladen voorwerp af halen.
- ♦ **PROTON** - Een klein, positief geladen deeltje dat zich in de atoomkern bevindt.
- ♦ **RADIOACTIVITEIT** - Een maat voor de hoeveelheid straling die een stof per seconde uitstraalt.
- ♦ **RADIOGOLVEN** - Een soort elektromagnetische straling met zeer lange golflengtes. Radiogolven worden onder andere gebruikt om tv- en radiosignalen door te geven.
- ♦ **RÖNTGENSTRALING** - Een soort elektromagnetische straling met een zeer kleine golflengte. Röntgenstraling wordt onder andere gebruikt om botbreuken op te sporen.
- ♦ **UV-STRALING** - Een soort elektromagnetische straling met een korte golflengte. UV-straling zit in zonnestralen en zorgt er voor dat je bruin wordt in de zon.

1.7.2 SAMENVATTING



Figuur 17: Aantrekken (boven) of afstoten (onder)

Wanneer een voorwerp niet evenveel positief geladen deeltjes als negatief geladen deeltjes heeft noem je dat voorwerp elektrisch geladen. Wanneer het aantal positieve en negatieve deeltjes wel gelijk is noem je een voorwerp neutraal.

Elektrisch geladen voorwerpen kunnen elkaar aantrekken en afstoten:

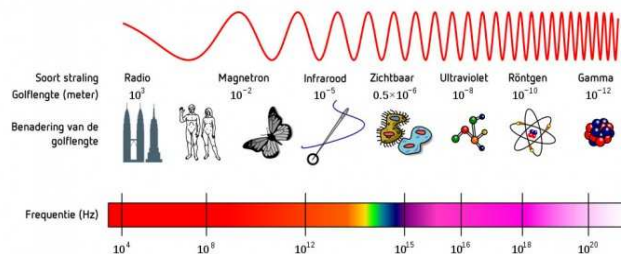
- ♦ positief + positief = afstoten
- ♦ negatief + negatief = afstoten
- ♦ positief + negatief = aantrekken
- ♦ geladen + neutraal = aantrekken

Elektrische lading kan worden gemeten met behulp van een elektroscop. Er bestaan drie verschillende soorten:

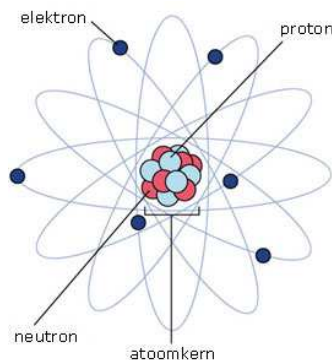
- ♦ Mergbal elektroscop
- ♦ Bladgoud elektroscop
- ♦ Spin elektroscop

Er bestaan verschillende soorten elektromagnetische straling zoals röntgenstraling, licht en radiogolven. Deze verschillende soorten straling verschillen alleen in frequentie en golflengte van elkaar.

De golflengte (λ), frequentie (f) en lichtsnelheid (c) hangen van elkaar af volgens de formule $f \times \lambda = c$.



Figuur 18: het elektromagnetisch spectrum



Figuur 19: een atoom

Bij radioactiviteit zenden atomen zelf een bepaalde straling uit. Er bestaan drie soorten: alfa-, bèta- en gammastraling. Deze drie soorten verschillen van elkaar in massa, elektrische lading en doordringend vermogen.

Atomen zijn de bouwstenen van alles om ons heen. Het zijn ontzettend kleine deeltjes die zelf ook weer bestaan uit nog kleinere deeltjes. Elk atoom bestaat uit een atoomkern en een elektronenwolk. In de atoomkern bevindt zich bijna alle massa van het atoom en deze bestaat uit protonen en neutronen. De elektronenwolk bestaat uit elektronen die rond de atoomkern draaien. De atoomkern is veel kleiner dan het totale atoom, dus het atoom is grotendeels leeg.

Met behulp van machten van tien is het mogelijk om zeer grote en zeer kleine getallen op een duidelijke en overzichtelijke manier op te schrijven. Bij getallen groter dan tien is de macht gelijk aan het aantal nullen in het getal, bijvoorbeeld: 1 miljoen = 1000000 = 10^6 . Bij getallen kleiner dan tien is de macht nog steeds gelijk aan het aantal nullen in het getal, maar staat er een minteken voor de macht, voorbeeld: 1 duizendste = 0,001 = 10^{-3} .

De ontdekking van kosmische straling begon in 1785 toen Charles-Augustin de Coulomb zag dat zijn elektroscop ontladde zonder dat hij het in contact bracht met een ander voorwerp of de aarde.

Wilhelm Röntgen (röntgenstraling) en Antoine Henri Becquerel (radioactiviteit) waren aan het einde van de 19^e eeuw de eersten die een mogelijke verklaring vonden voor de spontane ontlading van de elektroscop. Becquerel werd in zijn werk ondersteund door onder andere Ernest Rutherford, die de opbouw van het atoom ontdekte, en Pierre en Marie Curie.

De conclusies van Röntgen en Becquerel bleken niet de juiste te zijn en daarom werd in het begin van de 20^e eeuw meer onderzoek gedaan naar de oorsprong van de onbekende straling. Theodor Wulf ontdekte dat de intensiteit van de onbekende straling op de Eiffeltoren groter is dan verwacht.

Domenico Pacini was vervolgens de eerste die tot de conclusie kwam dat de onbekende straling van buiten de aarde afkomstig is in plaats van uit de aardkorst. Hij deed dit door de intensiteit van de straling op zee te meten.

Werner Kolhörster en Victor Hess bevestigden het idee van Pacini door de intensiteit van de straling te meten op grote hoogtes met behulp van luchtballonnen.

Zij concludeerden dat de straling uit het heelal afkomstig is en gaven het de naam 'kosmische straling'.