

NIKHEF/2006-004
physics/0604134

The Landscape “avant la lettre”

A.N. Schellekens¹

*NIKHEF Theory Group
Kruislaan 409
1098 SJ Amsterdam
The Netherlands*

and

IMAPP, Radboud University, Nijmegen

Abstract

This is a translation of an inaugural speech given originally in Dutch in 1998. The topic of that speech, intended for a general audience, was what is now called “The Anthropic Landscape of String Theory”.

¹t58@nikhef.nl

1 Introduction

In 2003 L. Susskind published his paper entitled “The Anthropic Landscape of String Theory” [1], which I read with great pleasure. The reason was that, many years before, I had come to the conclusion that everything we knew about String Theory was pointing towards an “anthropic landscape” of vacua. I had advocated this idea consistently during many years, on the basis of far less evidence than we have today. It seemed obvious to me, but the response I got was frustrating. Therefore I was delighted that finally someone was stating this point of view loud and clear. As Susskind correctly points out, the idea that the standard model might not be the unique outcome of String Theory seemed unacceptable to most people. In seminars he gave on the subject that statement was phrased more strongly, and became something like “Until recently all string theorists believed that the laws of our universe will follow uniquely from some selection principle in string theory”. I am quoting from memory, but I am certain about the “all”. Although I basically agree with that statement, the word “all” is an exaggeration.

Of course I understand that the expression “all string theorist” was used for theatrical purposes, and that the author must have known that at least a few string theorists have thought and talked about a possible non-uniqueness of the outcome, and about a possible rôle of the anthropic principle in relation to the string vacuum problem. For example, there is a footnote in a review article by F. Quevedo [3] from 1996, which discusses the anthropic outcome at least as an option that should be considered seriously. However it does seem to be true that remarkably few people have ever put their thoughts on this subject in print². That is a pity, because there are many subtle distinctions between various possible points of view, and it would have been interesting to know what other people were really thinking at a particular moment.

The purpose of this paper is to publish a text which may well be one of the earliest ones advocating the “Anthropic Landscape”, as it is now called, unequivocally. It is the translation of a speech I gave in 1998 [2], in Dutch, on the occasion of my inauguration at the University of Nijmegen. The Anthropic Landscape is not just described in this speech, it is the main topic. I tried to argue that an Anthropic Landscape of ground states of a consistent fundamental theory is not just the most likely but also the most desirable outcome of the age-old quest towards understanding our universe. In this respect, my arguments went quite a bit further than any other texts from that period that I am aware of.

I am not posting this text to claim any part of the fantastic discoveries made during recent years (for example [4], [5]; see [6] for a review and a complete list of citations). Indeed, the text says nothing about flux compactifications or the cosmological constant. I am posting it for a number of other reasons. I want to provide concrete evidence that rather precisely formulated ideas of this kind existed, and in written form, well before 2003. I also want to demonstrate that it was possible to arrive at this point of view even before the recent discoveries were made. Furthermore I have been fascinated by the

²I do not even know any other early examples than the footnote in [3]. However, such statements are hard to search for. I would be very much interested in learning about similar ones.

reaction to these ideas for many years now, and I think even today we are only in an intermediate stage of a very slow shift of opinions regarding the objectives of our field. Although landscape ideas and even the anthropic principle are now at least discussed, it seems to me that the importance of the landscape is still severely underrated. I have tried to express my enthusiasm about the recent progress during seminars, but apparently with little success. I think my feeling of excitement is a lot easier to understand if I back it up with this text, which precedes all recent developments, and hence was not influenced by them. If indeed the landscape gets the important place in science history that I expect, historians of science may be very puzzled why it took string theorists so long to arrive at this conclusion. I hope this text will help in answering that question.

My own thoughts in this direction started around 1987. The year before I had published a paper with Wolfgang Lerche and Dieter Lüst [7]. Like other authors at the time, we found large numbers of four-dimensional chiral string theories, but much more than others we made a point of strongly emphasizing the non-uniqueness of the result. In the following year we began to understand that this was perhaps a bit premature. There were moduli to be fixed, and supersymmetry had to be broken, and of course that could drastically change the conclusion. But it seemed to me that it was wishful thinking to assume that all these problems would be solvable for just one ground state, the one corresponding to the standard model. In addition, the standard model did not look like a unique solution to anything, and seemed fine-tuned to our own existence. I came to the conclusion that String Theory itself suggested the obvious way out of the dilemma of having at the same time a unique theory and on the other hand something as special as the standard model: a unique theory with a huge number of vacua. A rôle for the anthropic principle was inevitable in this scenario. A unique outcome of any argument not involving our own existence would create a disastrous anthropic fine tuning problem. Inexplicably, a mathematical computation would yield a point precisely in the presumably extremely small region of parameter space allowing intelligent life.

It seemed obvious. As obvious as saying that not the earth but the sun was the centre of the solar system. I expected that everyone would agree with me very quickly. But I was surprised by the reactions I got when I brought this up. I learned that the word “anthropic” provoked strong and often irrational reactions. And that there was indeed, as mentioned above, a strong hope or belief in an ultimate unique answer. In fact I say so in the 1998 text.

I have considered many times writing a paper about my ideas, but I could not bring myself to write something that seemed so obvious. It would have been a paper with many words and no formulas, and it was not at all clear where to publish it. There were no blogs, no homepages, no “arXiv”, and no obvious journal to send it to. And furthermore the hard evidence was not available yet. One valid objection was that we did not know enough about string theory yet to make any claim about the existence of a large number of non-supersymmetric, stable vacua. Today that is still an often-heard objection. My feeling about that was exactly what was written in [1], “if we find one such vacuum we are going to find a huge number of them”. To me that was clearly the message String Theory was sending us already in 1986, but most people preferred to ignore it, although

of course everyone agreed that the number of *supersymmetric* vacua was huge.

It is difficult and dangerous to claim with the benefit of hindsight that one arrived at some conclusion at a particular time. After 1986 it took some time to understand that all four-dimensional string vacua that were proliferating quickly had moduli, and that this was an important problem. It took some time to appreciate that they were all related to each other, and could be thought of as ground states of one theory, the Heterotic string. And of course there were five string theories, not just one. The most common attitude was to ignore the others and assume that one day we might know what was wrong with them. This was also my point of view until 1994, but uniqueness of the underlying theory was anyhow not the most crucial part of the argument. Apart from that issue, I was already defending a point of view quite similar to the one expressed in the 1998 speech during my time at CERN, which in any case means before 1992. I had discussions about that with many people and encountered a lot of resistance, and I do not recall anyone wholeheartedly agreeing with me. It is therefore somewhat strange that after 2003 some people started telling me “this is what I have always been saying”.

I would be one of those people now if I had not been offered a unique opportunity to put my point of view on record. I was put under some gentle pressure to give a speech on the occasion of my inauguration in Nijmegen. Usually such speeches describe the status of the field, with some emphasis on glorious achievements of theory and/or experiments, and then give some outlook on the future, or some comments on a theme of particular interest to the speaker. I was not particularly keen on giving such a speech until I realized that this, at last, was a unique opportunity to publicly advocate the point of view I had been talking about for so many years. Furthermore the simplicity of the main point was only a bonus here. These talks are typically attended by members of the family, friends, and colleagues from the same and other universities. This requires a difficult balancing act in order to explain something to an audience of outsiders of the field, and also trying to tell something worthwhile to your colleagues. The main point was simple to explain and at the same time controversial enough to be of interest.

The text of these speeches is printed as a small booklet and distributed among staff members and libraries of the various institutes in the Netherlands. The Dutch text is therefore authentic and unchangeable. It is included in this paper so that Dutch speaking persons can verify that I did not use hindsight to attempt to make changes during the translation, which was made in 2006.

There were in fact not many temptations to make changes. Reading the text again after eight years, I was worried to encounter remarks about which I had changed my mind in the meantime, but I was pleased to see that most things were written carefully, exactly as I often state them today, and exactly as I remember stating them at CERN in the late eighties. I was amused to discover that I even used the word “landscape” in the text, or rather the Dutch word “landschap” from which the English word was derived in the 16th century. That word was used once, in a sense not very different from the current one, but the expression I really used for what would now be called the “landscape of string vacua” was the Dutch word “gebergte”, which translates as “mountain range”. If I had translated this text to English in 1998, I would certainly have tried to find a more

attractive English term, and “landscape” would have suited my purpose very well. But of course that’s just a name.

The Dutch title was “naar een waardig slot”, which means something like “towards a worthy end”. I was trying to think of possible ways in which the story of high energy physics might end in a way worthy of its wonderful history, and concluded that a unique theory with a huge number of vacua and anthropic *raison d’être* of our universe was the most attractive outcome, and that this was precisely what String Theory was suggesting.

When reading the text one should keep in mind that it was written for a general audience. This required the usual shortcuts and simplifications. It also required me to drop some important issues. It made no sense to try and explain the problems of moduli stabilization or supersymmetry breaking in this context. The only place where I express my worries about that is in the sentence “At this moment it is not clear what will be left of this enormous number of ground states once we understand String Theory properly”. The cosmological constant is another important topic that is not mentioned, partly for the same reason, but mostly because at that time I was seriously confused about it. In 1987, when I started thinking along these lines, I assumed it was zero, and that we would find some mechanism to explain that. By 1998 evidence was coming in that it might not be zero, and I had become aware of Weinberg’s “anthropic” argument [8]. It looked like the cosmological constant was the anthropic variable *par excellence*, but this fact did not seem to fit in with the rest. I was convinced that a huge number of vacua was needed to understand the anthropic fine-tunings of the standard model, but to explain the 120 orders of magnitude fine tuning of the cosmological constant seemed too absurd to even consider. Nothing I knew suggested that there could be so many vacua.

Indeed, the most important point on which I was forced to change my mind since 1998 has been the size of the landscape. There is no clear statement about how large I expected the landscape to be, but the text does give a hint about that. At that time I was convinced that the current experimental data would be sufficient to pinpoint one particular vacuum as the one corresponding to our universe and our standard model. Then, if we would just find that one, everything else could be predicted. According to recent rough estimates by M. Douglas, that would be the case if there are less than about 10^{80} vacua (more or less uniformly distributed over a bounded region of parameter space), and if one does not take tuning of the cosmological constant into account. The amount of anthropic tuning in the standard model parameters is essentially impossible to estimate at present with any accuracy, because it requires computing all of cosmology, star evolution, chemistry, nuclear physics and biology etc. for a different choice of gauge group, representations and couplings. It is a number between 10^{-80} and 1, and presumably far from either limit. If the result were smaller than 10^{-80} we could use the anthropic principle to improve on the current experimental bounds on the standard model parameters, and this seems ridiculous. If the result were 1 this would imply that any choice of gauge theory, representations and parameters leads to something one could call “life”. If that notion seems too ill-defined for generic universes one could drop the “biology”, and talk about complex chemistry instead. It seems unlikely that a randomly chosen theory would lead to sufficient chemical complexity, but, as I say in the text, that is an assumption. It is

clear that the entire argument breaks down if the probability approaches 1. If indeed it is much smaller than 1, this kind of argument would require the number of vacua to be at least the inverse of that probability, and considerably larger to avoid any illusion of fine-tuning. In 1998 I was more worried that the number of string vacua that I knew was too small, than that it would be far larger than this lower bound.

Note that in the 1998 text I did not advocate the idea that any particular standard model parameter can be determined from anthropic arguments alone. An often stated objection to the anthropic principle is that it is like giving up physics and just declaring instead that “things are the way they are, since otherwise we would not exist”. However, as I already explained in 1998, the proper use of this principle presupposes a precise understanding of the landscape. It may well be that the anthropic principle is of no practical use for the determination of any standard model or cosmological parameter with the possible exception of the cosmological constant, simply because the necessary computations are too hard.

There will certainly exist functions on the landscape that affect the vacuum selection, such as the local density of certain kinds of vacua [9] or cosmological likelihood. It is important to compute such quantities, if possible, but I am convinced that they will not uniquely select our universe, for exactly the same reasons I stated in 1998. In fact, neither will the anthropic principle, which is just another function on the landscape (although hard to define precisely), giving the likelihood that “intelligent” life emerges in a given point on the landscape (an analogy with the “Drake equation” suggests itself here rather naturally). It would be absurd if our universe were the only point in the landscape that is sufficiently anthropic, and nothing we know suggests that. Perhaps some sort of convolution of all these functions will provide an answer close to the Standard Model.

Most people associate the Landscape with an anthropic solution to the cosmological constant problem. For me that was not the crucial issue. Even if we came to the conclusion that the cosmological constant was not anthropically tuned after all, I would still expect an anthropic landscape for the structure and parameters of the standard model. String Theory was the first and so far only theory that made the question about uniqueness of the standard model unavoidable. Most, if not all, other attempts to “derive” the structure of the Standard Model involve a new layer of gauge theories, for example composite models or GUTs. Then one inevitably runs once again into the same problem one tries to solve, namely an essential non-uniqueness. The most promising candidate, $SO(10)$ Grand Unification, requires an unexplained triplication of families and has a large number of parameters, even if one takes this choice of gauge group for granted. The only hope for uniqueness is a theory that itself has a chance of being unique, namely a theory of gravity. Such a theory, String Theory, was explored during the past decades, and it gives a very clear answer: there is no unique ground state, but a landscape of vacua. It is in my opinion the only answer that makes sense, and the fact that this answer came out of String Theory is a sign that we are on the right track. I see this as a fundamental result that may even survive if String Theory turns out to be incorrect, or if String Theory is just the tip of an iceberg.

I expect that the String Theory Landscape will acquire an important place in science

history. Of course its ultimate fate depends on the correctness of String Theory, and the unexpectedly huge size of the landscape is making it a lot harder to convince ourselves of that. But String Theory won't be correct without the landscape being correct. And if that is true, it would be one of the most fundamental discoveries one can make. It implies that we would know the answer to Einstein's question if the creator of our Universe had any choice: indeed, we would know all the choices. This insight is probably the most important one we have obtained from string theory so far. It should be remembered that in 1984 this would have been completely unthinkable. Unlike the other main result we hope to get out of String Theory, consistent Quantum Gravity, the landscape emerged against everyone's initial expectations and wishes. It is a revolution that is unfolding so slowly that few people even recognize it as such. But nevertheless, discovering that our standard model is just one entity in a huge landscape, and hence cannot be completely derived from first principles, is a paradigm shift for our field.

I am tempted to continue with further remarks on the present state of affairs, and comment on some of the papers and other texts that have appeared in the last few years. The fact that these issues are now being discussed is by itself an exciting development. But many of the remarks I could make would just be a rephrasing of what I wrote in 1998, and I prefer to let that text speak for itself.

2 The English Translation of [2]

"High Energy Physics" has a special place within physics. This is already apparent from its name. Most fields within physics are called after what they study. Solid state physics studies properties of solids, atomic physics studies atoms, and nuclear physics nuclei. But a high energy physicist does not study "high energy". The name of the field is derived from the experimental techniques that are used. The essence of this field is the study of matter at ever shorter distance scales. To achieve this, beams of particles of very high energy are collided against each other. The higher the energy, the deeper one penetrates into the matter. Our field effectively started with the invention of the microscope, but it really started moving ahead in this century. We learned that matter consists of molecules, which are built out of atoms. The atoms consist of a nucleus with a cloud of electrons around it, and the nucleus consists of protons and neutrons. Every time you look deeper, new phenomena seem to appear. Perhaps this is the reason our field is not named after its field of study; after all, this changes all the time. Sometimes one calls it "elementary particle physics", but when that name was introduced one believed that protons and neutrons were elementary. Meanwhile we know that this is not true. The proton and the neutron are not elementary, but consist of other particles, the quarks. If it turned out that the quarks themselves consisted of other particles, our attention would automatically shift to those particles. There is, however, no evidence for this at present.

One could say that the essential difference between High Energy Physics and all other branches of physics is that the former investigates vertically, whereas all other investigate horizontally. That definition essentially implies an end of the discipline. It seems

inevitable that one day we will run into a limit which makes it impossible to penetrate deeper into matter. This would imply that nature at its deepest level will forever be beyond our observation. If what we cannot see is as complicated as what we have seen already, there will be no chance to guess the answer. This seems the most likely end of our field.

It is less clear when that end would be reached. During the last 50 years the technological limits have been shifted continuously, and more and more impressive machines were built. One of these successes is for example LEP in Geneva, a circular particle accelerator with a circumference of 27 kilometers, where electron and positron beams are collided with large energy and astonishing precision. Each time such a machine is commissioned, the next one is already on the drawing board. Technologically the end may appear to be in sight, but that is already true for twenty years, and there are still new accelerators being planned or being built.

An unforeseeable technological revolution could postpone the end of this road substantially, but eventually we will encounter fundamental or practical limitations. This becomes painfully clear if we consider the smallest distances that might be of interest theoretically. In theories of Quantum Gravity interesting phenomena are happening at distances the size of the Planck length, which is about 10^{-33} cm. This is so terribly small that observing it with our most powerful particle accelerators is something like trying to see protons on the moon with a telescope. With an accelerator like LEP we can penetrate to about one hundredth of the size of a proton. A machine that can see structures the size of the Planck length has to accelerate particles to a gigantic energy, the Planck energy. To construct such an accelerator with current technology would require a machine with at least the size of our entire galaxy. It is an interesting question if this can be done even theoretically, but it can certainly not be done in practice.

Although the majority of experiments is done with particle accelerators, there are other, less direct methods to learn something about the deeper structure of nature. But no matter which method is used, one can always imagine phenomena which are beyond our observation. We can imagine particles with so little interaction, or events that are so improbable that we will never see them. It is difficult to see why nature should always be so friendly to us to let us see all its secrets.

I regard this as an unpleasant idea. I see the development of fundamental physics in this century as an exciting book, which is difficult to put aside without having read the last chapter. It is a beautiful story that deserves a worthy end. It would be very disappointing if the last chapter turned out to be forever unreadable to us.

Then what is really our goal? Most of my colleagues will only formulate an answer to this question with great hesitation, because it sounds on the one hand rather arrogant, and on the other hand hopelessly naive. You could describe it as the “Theory of Everything”. This term was used for the first time a few years ago in a moment of euphoria about a new breakthrough, and was generally met with derision. What do you mean, “Theory of everything”? Does that theory have something to say about superconductivity? Can you derive the human genetic code from it? Can you use it to predict the weather? The list of questions humans struggle with is endless. A theory that answers all questions is

unthinkable.

If we nevertheless want to formulate a reachable and acceptable final goal, we will have to limit the questions to which we may expect an answer. This implies, among other things, that the questions should not be too complicated. For example the DNA molecule is so complicated, that it will never be derived directly from a fundamental theory. Nevertheless we know already for decades what that fundamental theory is: it is Quantum Electrodynamics. When we ask sufficiently simple questions, this theory gives extremely precise answers. In high energy physics most questions are ultimately reduced to simple questions, such as: what exactly happens when two particles collide with a given energy. When we have convinced ourselves that all questions of that type can be answered one of the requirements of a Theory of Everything has been met, as far as I am concerned.

In fact, we almost have such a theory at our disposal. It has been given the not very impressive name “Standard Model”. This theory describes three of the four fundamental forces we know. In the first place this includes the already mentioned Quantum Electrodynamics. This interaction manifests itself in many ways in the world around us: light, electricity, magnetism, chemistry and most properties of materials are all controlled by this theory. Then there is Quantum Chromodynamics, which among other things is responsible for the fact that protons and neutrons are held together in nuclei. Finally there is the weak force, which manifests itself for example in radioactivity. For all these phenomena we have a very an extremely successful fundamental theory, that for already twenty-five years passes all experimental tests convincingly. When people look back at this century in the future, the Standard Model will undoubtedly be mentioned as one of the great breakthroughs in physics, together with Quantum Mechanics and Relativity.

Nevertheless no-one will be inclined to replace the unpretentious name “Standard Model” by “Theory of Everything”. There are a few reasons for this. First of all one of the four known interactions, gravity, is missing. At first sight this does not look like a really big problem. For gravity we also have an excellent theory, Einstein’s General Relativity, one of the crown jewels of this century. Just like the Standard Model, this theory makes extremely precise predictions that agree with a large number of experiments. Unfortunately this theory does not coexist very peacefully with Quantum Mechanics. This implies concretely that we are unable to make predictions when particles collide with each other with Planckian energies, or for extreme phenomena in the neighborhood of black holes. It is extremely unlikely that we will ever be able to actually observe such processes, but we expect a theory of everything to give an answer in these circumstances as well.

The Standard Model, on the other hand, has no problems with Quantum Mechanics. It is formulated in terms of Quantum Field Theory, which is founded solidly on its two pillars, Quantum Mechanics and Special Relativity. Nevertheless we are not at all certain that the Standard Model is correct. The Standard Model contains 17 particles, 16 of which have been found so far. One is still missing, the so-called Higgs particle. This particle is rather different from the other 16, and is generally seen as the weakest link in the Standard Model. The existence of this particle was postulated twenty-five years ago, because it is essential for the consistency of the Standard Model. But on the other hand

it became clear fairly quickly that it introduces a new problem. I will not explain in detail what the problem is. Essentially, the problem is that the weak force, despite its name, is far stronger than one would reasonably expect.

There is more about that Standard Model that we don't like. For example it has a lot of parameters, namely at least 19 and probably more. A parameter is a number whose value is not fixed by the theory. For example the Standard Model does not tell us what the quarks weigh. The masses of the six quarks can only be determined by measuring them. Once all parameters have been measured, the theory is fixed and every other quantity can be computed. Although 19 parameters is not really very much, we might have preferred fewer, for example none at all.

What worries us even more is the fact that some of these parameters have rather special values. For example the ratio of the mass of the electron with that of the heaviest quark, the top quark is very small, less than 10^{-5} . Since the Standard Model does not say anything about the masses, every number could have come out. When you observe then that such a number is very small in nature, you get the feeling that you should be able to understand that. The aforementioned problem with the Higgs boson is of a similar nature, but more severe. It is like being in a room with a hundred people, and discovering that they are all born on the same day. The likelihood that this happens by accident is so small that you would immediately assume that there has to be an explanation. In the physics of our universe we see a variety of such unlikely coincidences.

Something else many people don't like about the Standard Model is that it is by no means the only possibility. When Einstein wrote down the Theory of General Relativity he basically did not have any choice. But the people who conceived the Standard Model had lots of variations at their disposal. Thirty years of intense experimental research have thrown most of these variations into the dustbin, but many people would really prefer to do that on purely theoretical grounds. They would really prefer a unique theory.

Nevertheless it seems less certain that we should be able to answer this type of question. Essentially we only have questions of this type left in the Standard Model. These are all "why" questions. Why exactly this Standard Model, why do the parameters have the observed values and why are certain values so small. It is inevitable that some questions of this type remain in a theory. The fact that such questions are not answered is not a reason to withhold the predicate "Theory of Everything". We should definitely do that if it was inconsistent or in disagreement with experiment.

What I have been trying to say in the foregoing is that the concept "Theory of Everything" is not necessarily a "castle in the sky" provided one does not have the wrong expectations. The Standard Model is not only an excellent model for three of the four forces of nature and all matter, but also for the very concept "Theory of Everything". Apart from a few issues, it is really precisely what we are looking for.

The Standard Model has another problem that is rarely mentioned as such, but that for me is essential. It is in complete agreement with everything we can see, but it has nothing to say about what we cannot see. If new experiments discover new particles or interactions we will have to extend the Standard Model. Quantum Field Theory allows lots of extensions. We may postulate that nature is described by the Standard Model plus

nothing else, but nothing guarantees that this is true. We will always depend on future experiments. This seems such an obvious point that no-one calls it a problem.

So what are our chances of ever finding that acceptable theory? I have already said that I am not optimistic about that. The Standard Model is not terribly complicated. If you use the correct language you can write it down in two or three lines. Nevertheless many experiments were needed to reach that point. Experiment and theory need each other. Without experimental help we have little chance.

But there may be a small chance. At the moment a theory is being developed that gives us some hope that perhaps we may accomplish this task. I am referring to something we call “String Theory”, usually translated to Dutch as “Snaar Theory”, but I don’t like the sound of that. The theory gets its name from the fact that all particles are realized as vibrations of a kind of fundamental string. The lowest harmonics correspond to the particles of the Standard Model, plus perhaps a few new particles. The higher harmonics correspond to an infinite series of particles that we can never observe, unless we can build a Planck Energy accelerator. [...] ³

Meanwhile it has become clear that the word “String” is much too limited and the word “Theory” a bit premature. We have discovered that in addition to strings also membranes play a role, and we have realized that what we called “String Theory” until now is just a small piece of a continent that to a large extent still has to be mapped out. For lack of a better name I will call that entire continent “String Theory” henceforth.

String Theory was discovered thirty years ago more or less accidentally in an attempt to understand the strong interactions. It became clear rather rapidly that this theory had magical properties, but soon a better alternative was found for the strong force, namely Quantum Chromodynamics. During ten years the theory, together with a handful of loyal followers, was essentially ignored, but in 1984 it made a triumphant return. In the mean time it had become clear that the theory had promising features for the description of an entirely different force, namely gravity. A few enlightened persons had already understood this in 1975, but they got little attention.

The 1984 revolution can be explained in particular by the fact that String Theory offered us a gift nobody had counted on. Apart from a possibly consistent theory of Quantum Gravity, String Theory turned out to contain particles and forces that resembled those of the Standard Model. This is a generic feature of good theories: bad theories always lack something essential, whereas good theories give you lots of things you could not reasonably count on.

If everything works out the way we hope this should, in the end, give us a theory that is completely consistent and contains all known particles and forces. I remarked before that we really would like a fundamental theory to give us also a complete description of everything we can not (yet) observe. String Theory has a property that seems to realize that. I am referring here to something that in special cases is described by the technical term “Modular Invariance”, and whose precise general form is not completely clear yet. In any case everything seems to indicate that one cannot freely add particles to a given String

³This phrase was not translated because it discusses why I prefer the English name “String Theory” over the Dutch name “Snaar Theory”, and this explanation make no sense in English.

Theory, or remove them. Once we have found a String Theory that contains exactly the Standard Model, we cannot add anything anymore. One cannot modify a string theory. The theory may predict new particles, but if an experiment finds a particle that was not expected, the entire structure collapses. Therefore String Theory can only yield a theory of everything, whether we like that term or not: it is all or nothing.

The work “nothing” is a bit exaggerated. At the very least we have a breathtaking piece of mathematics in our hands. String theory attracts theorists because it has marvelous features that are hard to explain to outsiders. It is a huge landscape through which theorists move around with a kind of Alice-in-Wonderland feeling. Every stone that is turned over turns out to hide new miracles, every path that one takes leads to fascinating views. It sometimes seems as if String Theory solves its own problems, and that we are just breathless spectators. Time after time new contradictions appear to emerge, which however are always solved by a new “String Miracle”. It gives the theory an air of untouchability, and sometimes makes you wonder how it could ever be falsified.

These magical properties have a downside as well. They are fascinating some theorists to such an extent that the ultimate goal is sometimes forgotten. That goal now seems further away than in 1984. Despite great promises, String Theory has not yet produced any measurable result. We only see vague outlines of the Standard Model, and we are unable to work out the details. Part of the reason is that we are still trying to determine what String Theory really is.

Another reason is that we are faced with a huge number of possibilities. Perhaps one would expect from a candidate “Theory of Everything” that it is unique, in other words, that there is only one possible outcome for the laws of physics. At present, however, the facts seem to point into a totally different direction.

When String Theory was reborn in 1984, there was a lot of talk about “uniqueness”, but that was clearly premature. In 1984 we did not know one, but five String theories. Then things went out of control rapidly. The five theories existed in a world with nine space and one time dimensions, ten dimensions in total. Our space also has one time, but only three space dimensions, height, width and depth. In the years after 1984 it became clear rapidly that it was much simpler to build String Theories in four dimensions than in ten. Instead of five there turned out to be billions of possibilities, actually infinitely many.

I was involved in these developments in 1986, and in our paper we put special emphasis on the large number of solutions. This was not regarded as good news. Many years later I even met someone who claimed that our work had convinced him to abandon String Theory and work on something else. Of course this was not our intention. I believe I was one of the few people that regarded this large number of String Theories as a positive development, and I will explain in a moment why.

Gradually after 1986 some order was created in the chaos, and it started becoming clear that all these distinct String Theories were really part of a larger entity after all. They could all be related in one way or another to one of the five String Theories in ten dimensions. To go from ten to four dimensions, six of the ten dimensions are “rolled up”, so that we can only observe four.

Usually we regard all these four-dimensional String Theories as so-called “ground states” of one of the ten-dimensional ones. To understand the concept of a ground state one may think of a mountain range with many valleys. In this picture the mountain range represents the theory, and the valleys the distinct ground states. Inhabitants of each of these valleys only see a small part of the entire mountain range. Nevertheless, everything is ultimately connected.

This picture restores the lost uniqueness to some extent. There may be many ground states, but there is just one theory. At least, that would be the ideal situation. But up to now we still had five theories instead of one. That corresponds to five mountain ranges, each with its own valleys. Four years ago this suddenly changed. The five mountain ranges all turned out to be the same, but viewed from different angles. Just as the Mont Blanc looks totally different from Italy or France, apparently totally different String Theories turned out to be different ways of looking at the same theory. Unfortunately we have not found an exact formulation of this overarching theory. Many people are looking for that at the moment.

Everything seems to point in the direction that we are dealing with only one theory, but that this theory has a huge number of ground states. Just like each mountain valley may have its own laws and customs, every ground state has its own system of laws of physics. Instead of electromagnetic, strong and weak forces there will be other interactions, instead of quarks and leptons other particles. If String Theory is correct, one of these many possibilities is realized in our universe. One of the big challenges is to demonstrate that our universe is indeed one of these possibilities.

We can only discuss other ground states purely theoretically. In contrast to an inhabitant of a mountain valley, who in principle could go and have a look at another valley, we would not even be able to exist in another ground state. The quarks and leptons out of which we are composed do not even exist there. Nevertheless it seems just a small step to assume that other ground states might be realized in another universe. Such a statement lies, however, beyond the boundaries of physics. By definition, physics cannot make statements about things that cannot be observed. We can only speak in theoretical terms about other possible universes. They are solutions to the same equations satisfied by our own universe.

This line of thought fits in very well with a series of insights that pointed out our modest place in the cosmos. Our planet is not the center of the solar system, our sun is just one of many stars and not even a very special one, and the same is true for our galaxy. It seems natural to assume that also our universe, including the quarks, leptons and interactions we observe is just one out of many possibilities.

This way of thinking has important consequences. If indeed our universe, including its laws of physics and the entire Standard Model is just out one of many possibilities, this implies that there are limits to what we can compute. The properties of the quarks and leptons, their interactions and the parameters of the Standard Model (or at least part of them) were fixed at the birth of our universe, when a choice was made out of the many possibilities. We will never be able to compute that choice, because it could just as well have been different.

I have the impression that many of my colleagues believe or hope that this will ultimately not be the case. They hope to find a kind of mathematical formula that has only one solution. That single solution should then correspond to our four-dimensional world, including all quarks, leptons and the four basic forces. Also the values of the nineteen (or more) parameters, such as the masses of all particles, should then ultimately emerge as the outcome of a mathematical computation.

It could indeed be like that. At this moment it is not clear what will be left of this enormous number of ground states once we understand String Theory properly. At first sight it may seem attractive that only one should survive, but if you think about it for a moment it becomes clear that this would really be an undesirable end to the story.

I will try to explain this, but first I will make an instructive historical comparison. Kepler, a great scientist whom we all know because of his theory of planetary orbits, believed that the distances of the planets to the sun were fundamental parameters, that should be computable. He invented an ingenious theory with embedded Platonic solids. With our current knowledge Kepler's attempt seems absurd. Kepler did not know about the existence of the planets Uranus, Neptune and Pluto, and this fact alone already destroys his theory. If he had known about the existence of other solar systems he would not even have started. Nevertheless one cannot blame Kepler for trying. One should not assume too soon that something can never be computed. Once you have gathered enough insight it will become clear what can be computed and what cannot. It seems very well possible to me that in some time we will arrive at the insight that other worlds with other laws of physics are indeed possible. Attempts to compute the parameters of the Standard Model will then look equally naive as what Kepler had in mind.

Although the choice of distinct ground states is arbitrary from a mathematical point of view, it is not from a human point of view. Our existence is tightly linked to the Standard Model and the precise values of a number of parameters. A well-known example are the masses of the two quarks out of which the proton and the neutron are made. These quarks are called "up" and "down", and the latter is heavier than the former. This has the pleasant consequence that the proton is stable, whereas a free neutron decays in about fifteen minutes into a proton and an electron. If we interchange the two quark masses it is just the other way around. The proton would decay rapidly into a neutron and a positron. The hydrogen atom would then be unstable, just as the water molecule. There is a long list of examples of this type. Some are more impressive, but a bit harder to explain.

Our entire existence depends on a series of subtle processes that occurred during the evolution of the universe. These processes have finally led to a planet where, for example, the crucial element Carbon occurs with sufficient abundance. Various steps in this process depend critically on the parameters of the Standard Model, such as the masses of particles and the strength of interactions. It seems often easy to demonstrate that even small changes of certain parameters would obstruct the entire process.

From this point of view it would seem absurd that exactly those parameter values would follow from a mathematical computation. We would be left with a much bigger riddle than the one we are trying to solve. For this reason I was very satisfied when it

turned out that String Theory was highly non-unique. If our planet were the only one in the Universe, it would be a mystery why precisely that single planet would allow life. The fact that there are billions of planets makes the mystery considerably less severe. Analogously, the fact that many kinds of universes are possible makes the existence of conditions for intelligent life in our universe considerably less absurd than if there would be just one possibility.

This kind of reasoning is often referred to as the “anthropic principle”. In reality this is a collective name for a variety of ideas, some of which I find quite nonsensical. The anthropic principle states that the universe we observe is characterized by the fact that we exist as observers. It is hard to disagree with this. One can, however, disagree with the consequences that some people derive from it.

As far as I am concerned the anthropic principle only makes sense if our universe it not the only possible one. Furthermore it only makes sense within a completely consistent theory. Otherwise we do not know which changes of the parameters of our universe make sense. For example, it could well be that we are not allowed to change the up/down quark mass ratio at all. Although I would like to have many options for the laws of nature of our universe, I would still prefer the fundamental theory to be unique. String theory seems to accommodate these two demands that at first sight seem contradictory: according to our present insights there is just one theory, but many ground states are possible. This is really the best outcome one could imagine.

The anthropic principle could be the explanation for certain coincidences that are hard to understand from the point of view of the theory. It could explain why up quarks are lighter than down quarks, but this mass difference is not really that astonishing. It gets more interesting when we look at cases where parameter ratios are very small or very large. Well-known examples are the electron mass, which is improbably small, or the strength of the weak force. The value of both parameters is essential for the evolution of our universe and our existence, but this is not sufficient to conclude that we understand the values of those parameters.

What really matters is the question if for other parameter values some form of intelligent life is possible. If intelligent life would ultimately develop in every imaginable universe, it would still be impossible to understand why nature would go into extremes just to make our form of intelligent life possible.

This leads to a formulation of the anthropic principle that might fall within the boundaries of exact science. It requires first of all a theory that we fully control, and of which we know all possible ground states, and thereby all possible parameters and their allowed values. Furthermore we need a definition of intelligent life that is not based on our own quark-lepton world. For all the allowed ground states we should then compute if intelligent life is possible. If this is only possible for certain extreme parameter values, this would explain the values of those parameters.

Unfortunately given our current knowledge this programme is completely impossible to execute. It is already impossible to say if life in our own universe is possible under drastically changed conditions. It may seem reasonable to assume that the element Carbon is required, but on the other hand it is very hard to rule out other possibilities. I consider

the question whether intelligent life is possible in other valleys of the string mountain range extremely interesting, but many times more difficult.

Nevertheless, for me a worthy end of the story of High Energy Physics would already be the simple observation that we live in one of the many valleys of the string mountain range. This is a modest, but perhaps just achievable goal. If that is true, and if String Theory meets our expectations we have a complete theory for everything that happens in our universe, a theory that predicts precisely what we may expect from future experiments, and that does not leave room for surprises. It would be even better if we could also understand why we live in precisely this universe, and not in another. Unfortunately at this moment even the first, modest goal is not more than a beautiful dream.

The foregoing was a sketch of a possible end of the story. It is the end that given the current state of affairs seems the most desirable to me, but in the end only hard results matter. Nature will probably not care much about my wishes. Despite the word “end” in the title it was not at all my intention to suggest that the end will be reached soon. On the contrary, it will take many decades of work to produce a complete map of String Theory. I am looking forward to an exciting continuation of this adventure.

3 The original Dutch text

De Hoge Energie fysica neemt een speciale plaats in binnen de natuurkunde. Dat blijkt eigenlijk al uit de naam. De meeste vakgebieden binnen de natuurkunde zijn genoemd naar wat zij bestuderen. De vaste stof fysica bestudeert eigenschappen van vaste stoffen, de atoom fysica bestudeert atomen en de kernfysica atoomkernen. Maar een Hoge Energie Fysicus bestudeert geen Hoge Energie. De naam van het vak is ontleend aan de experimentele technieken die gebruikt worden. Het wezen van het vak is het bestuderen van de materie op steeds kleinere afstanden. Hiertoe worden bundels deeltjes met zeer hoge energie op elkaar geschoten. Hoe hoger de energie, hoe verder men in de materie doordringt. Ons vak begint eigenlijk bij de uitvinding van de microscoop, maar pas in deze eeuw is het echt goed op gang gekomen. We hebben geleerd dat materie bestaat uit moleculen, die weer zijn opgebouwd uit atomen. De atomen bestaan uit een kern met daarom heen een wolk electronen, en de kern bestaat weer uit protonen en neutronen. Steeds wanneer je nog dieper kijkt lijken zich nieuwe verschijnselen voor te doen. Wellicht is dat ook de reden dat het vak niet genoemd is naar het onderwerp van studie; dat verandert immers steeds. Men spreekt weliswaar ook wel van “Elementaire deeltjes fysica”, maar toen die naam voor het eerst gebruikt werd dacht men nog dat protonen en neutronen elementaire deeltjes waren. Intussen weten we wel beter. Het proton en het neutron zijn niet elementair, maar bestaan zelf weer uit andere deeltjes, de quarks. Wanneer zou blijken dat quarks zelf ook weer uit andere deeltjes zouden bestaan zou onze aandacht vanzelf verschuiven naar nieuwe, nog diepere structuren. Voorlopig hebben we daar overigens geen aanwijzingen voor.

Je zou dus kunnen zeggen dat het wezenlijke verschil tussen de Hoge Energie Fysica en alle andere takken van de natuurkunde is dat de eerste het zoekt in de diepte, terwijl alle

andere disciplines meer in de breedte werken. In die definitie van de Hoge Energie Fysica zit eigenlijk ook al het einde van het vak opgesloten. Het lijkt onvermijdelijk dat we eens tegen een grens zullen aanlopen die het ons onmogelijk maakt om nog dieper in de materie door te dringen. Dit zou betekenen dat de natuur zich op het allerdiepste nivo voor altijd aan onze waarneming onttrekt. Als wat we niet kunnen zien net zo gecompliceerd is als wat we al gezien hebben, is er geen enkele kans dat we het antwoord zouden kunnen raden. Dit lijkt mij het meest waarschijnlijke einde van dit vak.

Wanneer dat einde bereikt zal worden is minder duidelijk. De laatste 50 jaar zijn de technologische grenzen steeds verder opgeschoven, en zijn er steeds indrukwekkender machines gebouwd. Een van die successen is bijvoorbeeld LEP in Genève, een ringvormige deeltjesversneller met een omtrek van 27 kilometer, waarin electron en positron bundels met grote energie en verbijsterende precisie op elkaar geschoten worden. Steeds wanneer een dergelijke machine opgeleverd wordt ligt de volgende alweer op de tekentafel. Technologisch gezien lijkt het einde misschien in zicht, maar eigenlijk is dat al minstens twintig jaar het geval, en er zijn nu nog steeds nieuwe versnellers gepland of in aanbouw.

Een onvoorzienbare technologische revolutie zou het einde van deze weg fors kunnen uitstellen, maar uiteindelijk zullen we tegen fundamentele of praktische grenzen aanlopen. Dat wordt pijnlijk duidelijk wanneer we kijken naar de kleinste afmetingen die volgens theoretici interessant zouden kunnen zijn. In theorieën van Quantum Gravitatie spelen zich interessante verschijnselen af op afstanden ter grootte van de Planck lengte, dat is ongeveer 10^{-33} cm. Dit is zo vreselijk klein dat het waarnemen van dit soort structuren met onze krachtigste deeltjes-versnellers net zo iets is als proberen protonen op de maan te zien met behulp van een telescoop. Met een versneller als LEP kunnen we tot ongeveer een-honderdste van de grootte van een proton doordringen. Een machine die structuren ter grootte van de Planck lengte kan zien moet deeltjes versnellen tot een gigantische Energie, de Planck Energie. Wanneer we met de huidige technologie een dergelijke versneller zouden willen construeren, dan blijkt dat die machine minstens de grootte van het gehele melkwegstelsel zou moeten hebben. Het is een interessante vraag of dit zelfs puur theoretisch mogelijk is, praktisch mogelijk is het in ieder geval niet.

Hoewel de meerderheid van de experimenten met deeltjes-versnellers gedaan wordt zijn er andere, wat minder directe methodes om iets over de diepere structuren van de natuur te weten te komen. Maar welke methode ook gebruikt wordt, er zullen altijd verschijnselen denkbaar zijn die zich aan onze waarneming onttrekken. We kunnen ons deeltjes voorstellen die dermate weinig interactie met ons hebben, of gebeurtenissen die zo onwaarschijnlijk zijn, dat we ze nooit zullen zien. Het is moeilijk in te zien waarom de natuur ons altijd dermate vriendelijk gezind zou zijn dat we al haar geheimen uiteindelijk kunnen waarnemen.

Dit vind ik een onplezierige gedachte. Ik zie de ontwikkeling van de fundamentele natuurkunde in deze eeuw als een spannend boek, dat je moeilijk neer kunt leggen zonder het laatste hoofdstuk gelezen te hebben. Het is een prachtig verhaal dat een waardig slot verdient. Het zou een enorme teleurstelling zijn als het laatste hoofdstuk voor ons onleesbaar zou blijken.

Wat is eigenlijk ons doel? Het echte antwoord op die vraag wordt door de meeste van

mijn collega's hoogstens met grote aarzeling geformuleerd, omdat het enerzijds vrij arrogant en anderzijds hopeloos naief klinkt. Je zou het kunnen omschrijven als de "Theorie van Alles". Deze term werd enige jaren geleden voor het eerst gebruikt in een vlaag van euforie over een nieuwe doorbraak, en werd over het algemeen met hoongelach ontvangen. Hoezo, Theorie van Alles? Vertelt die theorie ons iets nieuws over supergeleiding? Kun je er de genetische code van de mens uit afleiden? Kun je er dan misschien het weer mee voorspellen? De lijst van vragen waarmee mensen worstelen is eindeloos. Een theorie die al die vragen kan beantwoorden is ondenkbaar.

Als we toch een bereikbaar en aanvaardbaar einddoel willen formuleren zullen we de vragen waarop we een antwoord mogen verwachten moeten beperken. Dit houdt onder meer in dat de vragen niet te ingewikkeld mogen zijn. Het DNA molecuul bijvoorbeeld is dermate ingewikkeld, dat het nooit direct uit een fundamentele theorie zal worden afgeleid. Niettemin weten we al decennia wat die fundamentele theorie is: het is de Quantum Electrodynamica. Wanneer we voldoende eenvoudige vragen stellen geeft deze theorie uitermate precieze antwoorden. In de hoge energie fysica worden de meeste vragen uiteindelijk gereduceerd tot simple vragen zoals: wat gebeurt er precies als twee deeltjes met een bepaalde energie op elkaar botsen. Wanneer we ons ervan overtuigd hebben dat we alle vragen van dat type kunnen beantwoorden is wat mij betreft aan een van de eisen voor een Theorie van Alles voldaan.

Eigenlijk hebben we al bijna een dergelijke theorie tot onze beschikking. Deze wordt aangeduid met de weinig indrukwekkende naam "Standaard Model". Deze theorie beschrijft drie van de vier fundamentele krachten die we kennen. Op de eerste plaats is dat de al genoemde Quantum Electrodynamica. Deze interactie manifesteert zich op vele manieren in de wereld om ons heen: licht, electriciteit, magnetisme, chemie, en de meeste eigenschappen van materialen vallen allemaal onder deze theorie. Dan is er de Quantum Chromodynamica, die er onder andere voor zorgt dat de protonen en neutronen in kernen bij elkaar gehouden worden. Tenslotte is er de zwakke kracht, die zich bijvoorbeeld manifesteert in radioactiviteit. Voor al deze verschijnselen hebben we een uitermate succesvolle fundamentele theorie, die al vijftig jaar lang een indrukwekkende reeks experimentele verificaties met verve heeft doorstaan. Wanneer men in de toekomst terugkijkt op deze eeuw zal het Standaard Model ongetwijfeld genoemd worden als een van de grote doorbraken in de fysica, samen met de quantum mechanica en de relativiteits theorie.

Toch zal niemand geneigd zijn de weinig pretentieuze naam "Standaard Model" te vervangen door "Theorie van Alles". Daar zijn een aantal redenen voor. Op de eerste plaats ontbrékt een van de vier bekende interacties, namelijk de zwaartekracht. Dat lijkt op het eerste gezicht geen al te groot probleem. Ook voor de zwaartekracht hebben we een uitstekende theorie, Einstein's algemene relativiteits theorie, een van de parels van de natuurkunde van deze eeuw. Net als het Standaard Model geeft die theorie uiterst nauwkeurige voorspellingen die in overeenstemming zijn met een groot aantal experimenten. Helaas leeft deze theorie echter op gespannen voet met de quantum mechanica. Concreet betekent dit dat we geen voorspellingen kunnen doen wanneer deeltjes met Planck energie op elkaar botsen, of voor extreme verschijnselen in de buurt van zwarte gaten. Het is uitermate onwaarschijnlijk dat we dit soort processen ooit daadwerkelijk

kunnen waarnemen, maar van een Theorie van Alles verwachten we dat deze ook in dergelijke extreme omstandigheden een antwoord geeft.

Het Standaard Model heeft daarentegen geen problemen met de quantum mechanica. Het is geformuleerd in termen van Quantum Velden Theorie, en rust stevig op zijn twee pijlers, de quantum mechanica en de relativiteits theorie. Toch zijn we er allerm minst gerust op dat het Standaard Model geheel in orde is. Het Standaard Model bevat 17 deeltjes, waarvan we er tot nu toe 16 gevonden hebben. Er ontbreekt er dus nog een, het zogenaamde Higgs deeltje. Dit deeltje verschilt nogal van de andere 16, en het wordt algemeen gezien als de zwakste plek in het Standaard Model. Het bestaan van dit deeltje is al vijftwintig jaar geleden gepostuleerd, omdat het essentieel is voor de consistentie van het Standaard Model. Maar anderzijds werd al snel duidelijk dat het een nieuw probleem introduceert. Wat dat probleem is zal ik hier niet in detail uitleggen. Het komt er op neer dat de zwakke kracht, ondanks zijn naam, eigenlijk vele malen sterker is dan je redelijkerwijs zou mogen verwachten.

Er is nog meer wat ons niet bevalt aan het Standaard Model. Zo heeft het bijvoorbeeld wat veel parameters, namelijk minstens 19 en waarschijnlijk meer. Een parameter is een getal waarvan de waarde niet door de theorie wordt vastgelegd. Zo vertelt het Standaard Model ons bijvoorbeeld niet hoeveel de quarks wegen. De massa's van de zes quarks kunnen alleen bepaald worden door ze te meten. Wanneer alle parameters gemeten zijn ligt de theorie vast en kan elke andere grootte berekend worden. Hoewel 19 parameters niet echt veel is hadden we er misschien liever wat minder, bijvoorbeeld geen enkele.

Wat ons echter nog meer zorgen baart is het feit dat sommige van die parameters nogal speciale waarden hebben. Zo is bijvoorbeeld de verhouding van de electron massa met die van de zwaarste quark, de top quark, heel erg klein, minder dan een honderdduizendste. Aangezien het Standaard Model niets zegt over de massa's, had er elk getal uit kunnen komen. Als je dan constateert dat in de natuur zo'n getal heel erg klein is krijg je het gevoel dat je dit zou moeten kunnen begrijpen. Het eerder genoemde probleem met het Higgs boson is eigenlijk van dezelfde aard, maar nog wat erger. Het is net als wanneer je je in een zaal met honderd mensen bevindt, en je ontdekt dat ze allemaal op dezelfde dag jarig zijn. De kans dat dit toeval is, is dermate klein, dat je meteen aanneemt dat er een verklaring voor moet zijn. In de natuurkunde van ons heelal zien we verscheidene van dergelijke onwaarschijnlijke toevalligheden.

Iets anders wat velen niet bevalt is dat het Standaard Model bij lange na niet de enige mogelijkheid is. Toen Einstein de Algemene Relativiteits theorie opschreef had hij eigenlijk niet veel keus. Maar de bedenkers van het Standaard Model hadden talloze variaties voorhanden. Dertig jaar intensief experimenteel werk hebben vrijwel al deze variaties naar de prullenmand verwezen, maar eigenlijk zouden velen dat liever op puur theoretische gronden willen kunnen doen. Men zou dus liever een theorie hebben die uniek is.

Niettemin is dit een soort vragen waarvan het wat minder zeker lijkt dat ze beantwoord moeten kunnen worden. Eigenlijk hebben we in het Standaard Model alleen nog vragen over van dit type. Het zijn allemaal vragen die met "waarom" beginnen: waarom juist dit Standaard Model, waarom hebben de parameters de waarden die we waarnemen, en

waarom zijn sommige waarden zo klein. Het is onvermijdelijk dat er in een theorie vragen van dit type overblijven. Het feit dat dergelijke vragen niet beantwoord worden is dus geen reden om aan een theorie het predicaat “Theorie van Alles” te onthouden. Dat zouden we wel moeten doen als het inconsistent was of in strijd met experimenten.

Wat ik met het voorgaande heb willen zeggen is dat het begrip “Theorie van Alles” niet noodzakelijk een luchtkasteel is, mits men er niet de verkeerde verwachtingen van heeft. Het Standaard Model is niet alleen een uitstekend model voor drie van de vier natuurkrachten en alle materie, maar ook voor het concept “Theorie van Alles”. Op een paar punten na is het eigenlijk precies waar we naar op zoek zijn.

Het Standaard Model heeft een ander probleem dat zelden als zodanig genoemd wordt, maar voor mij wel essentieel is. Het is weliswaar volledig in overeenstemming met alles wat we kunnen waarnemen, maar het heeft niets te zeggen over wat we niet kunnen zien. Wanneer nieuwe experimenten nieuwe deeltjes of nieuwe interacties ontdekken zullen we het Standaard Model moeten uitbreiden. De Quantum Velden Theorie laat tal van uitbreidingen toe. We kunnen wel postuleren dat de natuur beschreven wordt door het Standaard Model zonder enige toevoeging, maar niets garandeert dat. We zijn dus altijd afhankelijk van verdere experimenten. Dit lijkt zo vanzelfsprekend dat eigenlijk niemand het ooit als probleem noemt.

Hoe staat het nu met de kansen om een aanvaardbare theorie ook werkelijk te vinden? Ik heb al gezegd dat ik daar niet optimistisch over ben. Het Standaard Model is niet zo vreselijk ingewikkeld. Als je de juiste taal spreekt kun je het in twee of drie regels opschrijven. Niettemin zijn er vele experimenten nodig geweest om zover te komen. Experiment en Theorie gaan nu eenmaal hand in hand. Zonder experimentele hulp maken we weinig kans.

Toch is er misschien nog een kleine kans. Er is op dit moment binnen de theorie een ontwikkeling gaande die ons enige hoop geeft dat we onze taak misschien toch tot een goed einde kunnen brengen. Ik doel hier op een iets wat we gewoonlijk “String Theorie” noemen. In het Nederlands wordt dat gewoonlijk met “Snaar Theorie” vertaald, maar ik vind dat niet prettig klinken. De theorie ontleent zijn naam uit het feit dat alle deeltjes gerealiseerd zijn als trillingen van een soort fundamentele snaar. De grondtonen corresponderen met de deeltjes van het Standaard Model, plus misschien een aantal nieuwe deeltjes. De boventonen corresponderen met een oneindige reeks deeltjes die we nooit zullen waarnemen, tenzij we een versneller met Planck energie zouden kunnen bouwen. Mijn voorkeur voor het woord “String” in plaats van “Snaar” heeft vermoedelijk te maken met de ruimere betekenis van het Engelse woord, wat immers ook koord of touwtje kan betekenen. Die betekenis past beter bij het beeld wat ik gedachten heb dan een strak gespannen viool snaar.

Overigens is intussen wel duidelijk geworden dat het woord “String” veel te beperkt is en het woord “Theorie” een beetje voorbarig. We hebben ontdekt dat naast snaren ook membranen een rol spelen, en we hebben ons ook gerealiseerd dat wat we tot nu toe “String Theorie” noemden slechts een klein hoekje is van een werelddeel wat nog grotendeels in kaart gebracht moet worden. Bij gebrek aan een betere naam zal ik dat hele werelddeel voorlopig maar “String Theorie” noemen.

String Theorie werd dertig jaar geleden min of meer bij toeval ontdekt bij pogingen om de sterke kracht te begrijpen. Al snel werd duidelijk dat deze theorie over magische eigenschappen beschikte, maar voor de beschrijving van de sterke kracht werd al spoedig een beter alternatief gevonden, de Quantum Chromodynamica. Tien jaar lang leidde de theorie, samen met een handjevol trouwe volgelingen, een kwijnend bestaan, om in 1984 een triomphale terugkeer te beleven. Inmiddels was duidelijk geworden dat de theorie veelbelovende eigenschappen had voor de beschrijving van een heel andere kracht, de zwaartekracht. Enige verlichte geesten hadden zich dat overigens in 1975 al gerealiseerd, maar zij vonden toen weinig gehoor.

De revolutie van 1984 is vooral te verklaren uit het feit dat String Theorie ons iets cadeau gaf waar eigenlijk niemand op gerekend had. Naast een mogelijk consistentie theorie van quantum gravitatie bleek String Theorie ook deeltjes en krachten te bevatten die leken op het Standaard Model. Dit is een algemeen kenmerk van goede theorieën: slechte theorieën komen altijd wat te kort, maar goede theorieën geven je van alles cadeau waar je redelijkerwijs niet op mocht rekenen.

Als alles uitkomt zoals we hopen zou dit uiteindelijk een theorie moeten opleveren die geheel consistent is en alle bekende deeltjes en krachten bevat. Eerder heb ik al gezegd dat ik eigenlijk ook zou willen dat een fundamentele theorie een volledige beschrijving geeft van alles wat we (nog) niet kunnen waarnemen. String Theorie heeft een eigenschap die dit lijkt te verwezenlijken. Ik doel hier op iets dat in speciale gevallen met de technische term “Modulaire Invariantie” wordt aangeduid, en waarvan de precieze vorm in algemene zin nog niet duidelijk is. In ieder geval wijst alles er op dat je aan een gegeven String Theorie niet straffeloos deeltjes kunt toevoegen of deeltjes kunt weglaten. Als we dus eenmaal een String Theorie hebben gevonden die exact het Standaard Model bevat, kun je daar niets meer aan toevoegen. Aan een String Theorie kan niet gesleuteld worden. Het is best mogelijk dat de theorie nieuwe deeltjes voorspelt, maar als een experiment een niet verwacht deeltje vindt, dan stort daarmee het gehele bouwwerk in. String Theorie kan dus eigenlijk alleen maar een Theorie van Alles opleveren, of we die term nu prettig vinden of niet: Het is Alles of Niets.

Het woord “Niets” is een beetje overdreven. Op zijn minst hebben we een adembenemend stukje wiskunde in handen. String Theorie heeft een grote aantrekkingskracht op theoretici doordat het over wonderbaarlijke eigenschappen beschikt die aan buitenstaanders wat moeilijk zijn uit te leggen. Het is een reusachtig landschap waar theoretici zich doorheen bewegen met een soort Alice-in-Wonderland gevoel. Elke steen die omgekeerd wordt blijkt nieuwe wonderen te verbergen, elk pad dat ingeslagen wordt leidt tot fascinerende vergezichten. Het lijkt soms of String Theorie zijn eigen problemen oplost, waarbij wij slechts ademloze toeschouwers zijn. Keer op keer lijken zich interne tegenstellingen te openbaren, die echter stevast door een nieuw “String Wonder” opgelost worden. Het geeft de theorie iets onaantastbaars, en je vraagt je soms af hoe String Theorie nog gefalsificeerd zou kunnen worden.

Die magische eigenschappen hebben ook een schaduwzijde. Ze fascineren sommige theoretici zodanig dat het uiteindelijke doel soms uit het oog wordt verloren. Dat doel lijkt nu verder weg dan in 1984. Ondanks de mooie beloftes heeft String Theorie nog geen

enkel meetbaar resultaat opgeleverd. Van het Standaard Model zien we hoogstens een vage schim, de details kunnen we nog niet uitwerken. Dat komt voor een deel omdat we nog steeds bezig zijn te ontdekken wat String Theorie eigenlijk is.

Een andere reden is dat we met vreselijk veel mogelijkheden te maken hebben. Men zou misschien van een kandidaat Theorie van Alles verwachten dat deze eenduidig is, met andere woorden, dat er maar één mogelijke uitkomst is voor de wetten van de natuur. Voorlopig lijken de feiten echter een geheel andere richting uit te wijzen.

Toen String Theorie in 1984 herboren werd, werd veel over “uniciteit” gesproken, maar dat was duidelijk voorbarig. Ik 1984 kenden we namelijk niet één, maar vijf String Theorieën. Daarna liep het snel uit de hand. Die vijf String Theorieën bestonden namelijk in een wereld met negen ruimte en één tijd dimensie, dus tien dimensies in totaal. Onze eigen ruimte heeft ook één tijd, maar slechts drie ruimte dimensies, corresponderend met hoogte, breedte en diepte. In de jaren na 1984 werd snel duidelijk dat het in vier dimensies veel eenvoudiger was om String Theorieën te construeren dan in tien. In plaats van vijf bleken er miljarden mogelijkheden te zijn, of eigenlijk oneindig veel.

Ik was in 1986 zelf bij die ontwikkelingen betrokken, en in ons artikel werd dat grote aantal oplossingen met enige nadruk genoemd. Dat werd niet als goed nieuws beschouwd. Vele jaren later heb ik zelfs iemand ontmoet die beweerde dat ons werk hem ervan had overtuigd String Theorie te verlaten en iets anders te gaan doen. Dat was uiteraard niet onze bedoeling. Zelf was ik, denk ik, een van de weinigen die dit grote aantal String Theorieën wél als een positieve ontwikkeling beschouwde, en ik zal later uitleggen waarom.

Geleidelijk kwam er na 1986 wat orde in de chaos, en het begon duidelijk te worden dat al die verschillende String Theorieën eigenlijk toch deel uitmaakten van een groter geheel. Ze konden allemaal op een of andere manier gerelateerd worden met een van de vijf String Theorieën in tien dimensies. Om van tien naar vier dimensies te komen worden dan zes van de tien dimensies als het ware opgerold, zodat wij er slechts vier kunnen waarnemen.

Gewoonlijk beschouwen we al die vier-dimensionale String Theorieën als zogenaamde “grondtoestanden” van een van de vijf tien-dimensionale. Om het begrip grondtoestand te begrijpen kan men denken aan een gebergte met vele dalen. In dit beeld correspondeert het gebergte met de theorie, en de verschillende dalen met de verschillende grondtoestanden. De bewoners van ieder van die dalen zien slechts een klein deel van het gehele gebergte. Niettemin is uiteindelijk alles met elkaar verbonden.

Dit beeld herstelt de verloren eenduidigheid weer enigszins. Weliswaar zijn er vele grondtoestanden, maar er is slechts één Theorie. Althans, dat zou het ideaal zijn. We hadden echter nog steeds vijf theorieën in plaats van één. Dat correspondeert dus met vijf gebergtes, ieder met zijn eigen dalen. Vier jaar geleden kwam hier plotseling verandering in. De vijf gebergtes bleken in werkelijk allemaal hetzelfde, maar vanuit verschillende hoek bekeken. Net zoals de Mont Blanc er vanuit Frankrijk gezien geheel anders uit ziet dan vanuit Italië, zo bleken ook op het oog totaal verschillende String Theorieën eigenlijk verschillende benaderingen van dezelfde theorie te zijn. Helaas hebben we nog geen exacte formulering van die overkoepelende theorie. Daar wordt op dit moment druk naar gezocht.

Alles lijkt er op dit moment op te wijzen dat we weliswaar te maken hebben met één theorie, maar die theorie heeft een enorm aantal grondtoestanden. Net zoals elk bergdal

vaak zijn eigen wetten en gebruiken kent, zo behoort bij elke grondtoestand een ander stelsel natuurwetten. In plaats van electromagnetische, sterke en zwakke krachten zullen er andere interacties zijn, in plaats van quarks en leptonen andere deeltjes. Als String Theory correct is, is in ons heelal één van die vele mogelijkheden gerealiseerd. Een van de grote uitdagingen is aan te tonen dat ons heelal inderdaad tot de mogelijke oplossingen behoort.

Over andere grondtoestanden kunnen we slechts puur theoretisch discussieren. In tegenstelling tot een bewoner van een bergdal, die in principe een ander dal zou kunnen gaan bekijken, kunnen wij in een andere grondtoestand niet eens bestaan. De quarks en electronen waar wij uit zijn opgebouwd bestaan daar immers niet eens. Toch lijkt het slechts een kleine stap om nu aan te nemen dat andere grondtoestanden wellicht in een ander heelal gerealiseerd zouden kunnen zijn. Een dergelijke bewering ligt echter buiten de grenzen van de natuurkunde. Per definitie kan de natuurkunde geen uitspraken doen over zaken die niet waargenomen kunnen worden. We kunnen over andere mogelijke “heelallen” slechts theoretisch spreken. Het zijn oplossingen van dezelfde vergelijkingen waar ook ons heelal aan voldoet.

Deze gedachtengang past goed in een reeks van inzichten die ons op onze bescheiden plaats in de cosmos hebben gewezen. Onze planeet bleek niet het centrum van het zonnestelsel, onze zon is slechts een van de vele sterren en niet eens een heel bijzondere, en hetzelfde geldt voor ons gehele melkwegstelsel. Het lijkt vrij natuurlijk om aan te nemen dat ook ons heelal, inclusief de quarks, leptonen en interacties die we waarnemen slechts een van vele mogelijke is.

Er zijn belangrijke consequenties verbonden aan deze manier van denken. Als het inderdaad zo is dat ons heelal, inclusief zijn natuurwetten en het gehele Standaard Model slechts een van vele mogelijkheden is, dan impliceert dit dat er grenzen zijn aan wat we kunnen uitrekenen. De eigenschappen van de quarks en leptonen, hun interacties, en de parameters van het Standaard Model (of althans een deel daarvan) zijn bij het ontstaan van het heelal vastgelegd, waarbij een keuze gemaakt is uit de vele mogelijkheden. Die keuze zullen we nooit kunnen uitrekenen, want die had immers ook anders kunnen zijn.

Ik heb de indruk dat vele van mijn collega's geloven of hopen dat dit uiteindelijk niet het geval zal zijn. Men hoopt een soort wiskundige formule te vinden die maar één uitkomst heeft. Die ene uitkomst zou dan moeten corresponderen met onze vierdimensionale wereld, inclusief alle quarks, leptonen en de vier basiskrachten. Ook de waarden van de negentien (of meer) parameters, zoals de massa's van alle deeltjes zouden uiteindelijk als oplossing uit een wiskundige berekening moeten komen rollen.

Het zou inderdaad zo kunnen zijn. Op dit moment is niet duidelijk wat er van die enorme aantallen grondtoestanden overblijft wanneer we String Theory echt goed begrijpen. Het lijkt op het eerste gezicht misschien aantrekkelijk dat er maar één overblijft, maar als je er even over nadenkt wordt duidelijk dat dit eigenlijk een ongewenst einde van het verhaal zou zijn.

Ik zal proberen dat duidelijk te maken, maar eerst wil ik een leerzame historische vergelijking maken. Kepler, een groot geleerde die we allemaal kennen van zijn theorie van de planetenbanen, dacht dat de afstanden van de planeten tot de zon fundamentele

parameters waren, die uitgerekend moesten kunnen worden. Hij bedacht er een ingenieuze theorie voor met in elkaar ingebedde regelmatige veelvlakken. Met onze huidige kennis van zaken lijkt Kepler's poging absurd. Kepler wist niet van het bestaan van de planeten Uranus, Neptunus en Pluto, en dit feit alleen al haalt zijn theorie onderuit. Als hij geweten had van het bestaan van andere zonnestelsels was hij er niet eens aan begonnen. Toch kun je Kepler niet verwijten dat hij het probeerde. Je moet niet te snel aannemen dat iets nooit uitgerekend zal kunnen worden. Wanneer je voldoende inzicht verwerft zal uiteindelijk vanzelf wel duidelijk worden wat je wel en niet kunt uitrekenen. Het lijkt me heel goed mogelijk dat we over enige tijd tot het inzicht komen dat er inderdaad ook andere werelden met andere natuurwetten mogelijk zijn. Pogingen om alle parameters van het Standaard Model uit te rekenen zullen dan even naïef overkomen als wat Kepler beoogde.

Hoewel de keuze uit de verschillende grondtoestanden willekeurig is vanuit wiskundig oogpunt, is dat niet zo vanuit menselijk oogpunt. Ons bestaan is zeer nauw verbonden met het Standaard Model en de precieze waarden van een aantal parameters. Een bekend voorbeeld zijn de massa's van de twee quarks waaruit het proton en het neutron bestaan. Die quarks worden "up" en "down" genoemd, en het tweede is zwaarder dan het eerste. Dit heeft het plezierige gevolg dat het proton stabiel is, terwijl een vrij neutron in ongeveer 15 minuten uiteen valt in een proton en een elektron. Wisselen we de twee quark massa's om dan is het net andersom. Het proton zou dan zeer snel vervallen in een neutron en een positron. Het waterstof atoom zou niet stabiel zijn, evenmin als het water molecuul. Ons leven zou volstrekt onmogelijk worden, we zouden niet eens ontstaan zijn. Er bestaat een lange lijst van voorbeelden van dit type. Een aantal daarvan is nog indrukwekkender, maar wat lastiger uit te leggen.

Ons gehele bestaan hangt af van een subtiële reeks processen die zich gedurende de ontwikkeling van ons heelal hebben afgespeeld. Die processen hebben uiteindelijk een planeet opgeleverd waar bijvoorbeeld het cruciale element koolstof in voldoende mate aanwezig is. Verscheidene stappen in dit proces hangen op een kritieke manier af van parameters in het Standaard Model, zoals de massa's van deeltjes en de sterktes van interacties. Het lijkt vaak eenvoudig aan te tonen dat zelfs een vrij kleine wijziging van bepaalde parameters het proces volledig lam gelegd zou hebben.

Vanuit dit oogpunt lijkt het absurd dat precies die parameter waarden uit een wiskundige berekening zouden volgen. We zouden dan met een veel groter raadsel blijven zitten dan we proberen op te lossen. Om deze reden was ik ook zeer tevreden toen bleek dat String Theorie in hoge mate niet uniek was. Wanneer onze planeet de enige in het heelal zou zijn, zou het een raadsel zijn waarom juist die ene planeet leefbaar was. Het feit dat er miljarden planeten zijn maakt het raadsel aanzienlijk minder ernstig. Op analoge wijze maakt het feit dat er vele soorten heelal mogelijk zijn, het bestaan van condities voor intelligent leven in óns heelal aanzienlijk minder absurd dan wanneer er slechts één mogelijkheid zou zijn.

Dit soort redeneringen wordt vaak aangeduid met de term "anthropisch principe". Dit is eigenlijk een verzamelnaam voor verscheidene ideeën, waarvan ik er een aantal overigens vrij onzinnig vind. Het anthropisch principe stelt dat het heelal dat wij waarnemen wordt

gekenmerkt door het feit dat wij er zijn om het waar te nemen. Hiermee kan eigenlijk niemand het oneens zijn. Wel met de consequenties die sommigen hieraan verbinden.

Het anthropisch principe heeft wat mij betreft alleen zin als ons heelal niet het enig mogelijke is. Het heeft bovendien alleen zin binnen een geheel consistente theorie. Anders weten we namelijk niet welke veranderingen van de parameters van ons heelal zinvol zijn. Het zou bijvoorbeeld best zo kunnen zijn dat we de up/down quark massaverhouding helemaal niet kunnen veranderen. Hoewel ik graag vele mogelijkheden voor de natuurwetten van het heelal zou willen hebben, zou ik ook graag zien dat de fundamentele theorie uniek was. String Theorie lijkt die twee op eerste gezicht tegenstrijdige eisen in zich te verenigen: volgens onze huidige inzichten is er slechts één theorie, maar zijn er vele grondtoestanden mogelijk. Dit is eigenlijk de best denkbare uitkomst.

Het anthropisch principe zou de verklaring kunnen geven voor bepaalde toevalligheden die vanuit het oogpunt van de theorie moeilijk te begrijpen zijn. Het zou kunnen verklaren waarom up quarks lichter zijn dan down quarks, maar echt verbazingwekkend is dit massaverschil eigenlijk niet. Het wordt interessanter wanneer we kijken naar gevallen waar parameter verhoudingen zeer klein of zeer groot zijn. Bekende voorbeelden zijn de electron massa, die onwaarschijnlijk klein is, of de sterkte van de zwakke kracht. De waarde van beide parameters is essentieel voor de ontwikkeling van ons heelal en ons bestaan, maar dit is niet voldoende om te concluderen dat we de waarden van die parameters begrijpen.

Waar het werkelijk om gaat is de vraag of er voor andere parameter waarden enige vorm van intelligent leven mogelijk is. Als intelligent leven zich in elk denkbaar heelal uiteindelijk zou ontwikkelen is het nog altijd niet te begrijpen waarom de natuur zich in extremen zou begeven om juiste onze vorm van intelligent leven mogelijk te maken.

Dit leidt tot een formulering van het anthropisch principe die wellicht binnen het kader van de exacte wetenschap valt. Het vereist op de eerste plaats een theorie die we geheel onder controle hebben en waarvan we in het bijzonder alle mogelijke grondtoestanden kennen, en daarmee alle mogelijke parameters en hun toegestane waarden. Verder hebben we een definitie van intelligent leven nodig die niet op onze eigen quark-lepton wereld gebaseerd is. Voor elk van de toegestane grondtoestanden zouden we dan moeten uitrekenen of intelligent leven mogelijk is. Als dit alleen mogelijk is voor bepaalde extreme parameter waarden, zijn die waarden daarmee verklaard.

Helaas is dit programma met onze huidige kennis van zaken volstrekt onuitvoerbaar. Het is al vrijwel onmogelijk om te zeggen of leven in ons eigen heelal mogelijk is onder drastisch gewijzigde condities. Het lijkt bijvoorbeeld redelijk om aan te nemen dat hiervoor het element koolstof vereist is, maar het is anderszijds bijzonder moeilijk om andere mogelijkheden uit te sluiten. Of er in een van de andere dalen van het String gebergte intelligent leven kan bestaan is een vraag die ik bijzonder interessant, maar vele malen moeilijker vind.

Hoe het ook zij, een waardig slot van het verhaal van de Hoge Energie fysica zou voor mij al de eenvoudige constatering zijn dat wij in een van die vele dalen van dat String gebergte leven. Dit is een bescheiden, maar heel misschien haalbaar doel. Als dat zo is, en als String Theory aan onze verwachtingen voldoet, hebben we een complete

theorie voor alles wat er in ons heelal gebeurt, een theorie die precies voorspelt wat we in eventuele toekomstige experimenten nog mogen verwachten, en die geen ruimte laat voor verrassingen. Het zou helemaal mooi zijn als we ook nog kunnen begrijpen waarom wij juist in dit heelal leven en niet in een ander. Helaas is op dit moment zelfs het eerste, bescheiden doel niet meer dan een mooie droom.

Het voorgaande was een schets van een mogelijke afloop van het verhaal. Het is de afloop die mij gezien de huidige stand van zaken het meest wenselijk lijkt, maar uiteindelijk tellen slechts de harde resultaten. De natuur zal zich van mijn wensen vermoedelijk weinig aantrekken. Ondanks het woord “slot” in de titel was het bepaald niet mijn bedoeling om te suggeren dat het einde al spoedig bereikt zal worden. Integendeel, het zal nog vele decennia werk vergen om String Theorie volledig in kaart te brengen. Ik verheug me op een boeiende voortzetting van dit avontuur.

4 Added Notes

After posting the first version of this paper I received several reactions pointing out related remarks and ideas. I decided not to modify the original text (apart from correcting misprints), but to add this section.

Paul Townsend sent me a response to the footnote on page 2 and suggested the first paragraph of [10] as an example, which indeed it is. Lee Smolin drew my attention to his ideas on “cosmological natural selection” [11]. I knew this work, but not that his ideas originated from worries about the string vacuum explosion, as explained in chapter 5 of his book [12]. This chapter certainly needs to be mentioned in this context, although Smolin’s point of view is rather different from mine. He also pointed out Strominger’s 1986 paper [13], presumably one of the very first to raise the possibility of a highly non-unique outcome. Other papers from 1986 that made this point were the ones on the fermionic constructions, [14] and [15] and the bosonic construction [7], already mentioned in the original text. It is rather interesting to see how the various authors commented on this issue.

I wanted to avoid discussing the vast number of anthropic ideas and their history, and consequently did not include any references to papers in this area, with the exception of what I called “Weinberg’s anthropic argument” for the cosmological constant. However, as John Barrow correctly pointed out, an earlier (and different) anthropic argument for a small cosmological constant appeared in the book by Barrow and Tipler [16], which contains an extensive discussion of anthropic ideas, and many references. Now that I have entered into the tricky business of citing anthropic papers, I should definitely mention the ideas of Andrei Linde on the anthropic principle in inflationary cosmology, going back to 1983 (see [17], and references therein). I learned about his work a few years later, when I started discussing my point of view with some colleagues at CERN⁴ However, I do not recall any specific paper that influenced my thoughts on the anthropic principle. I am certain that I knew about the up/down quark mass interchange argument, and that I had seen the term “anthropic principle” before 1986, but I do not even remember if I had any opinion on it. It was really the apparent non-uniqueness of the string vacuum that forced me in this direction.

Acknowledgements: I would like to thank Beatriz Gato-Rivera for carefully reading the English part of the text, and for comments and discussions. Furthermore I would like to thank all people who reacted for their appreciative comments, and especially L. Susskind for his enthusiastic and generous message.

⁴The way I learned about his work was that someone at CERN told me “what you are saying sounds like this disgusting anthropic principle that Linde is writing about”. I have never understood the reason for the disgust.

References

- [1] L. Susskind, “*The anthropic landscape of string theory*” arXiv:hep-th/0302219.
- [2] Bert Schellekens, “*Naar een waardig slot*”, 16 September 1998, ISBN 90-9012073-4
- [3] F. Quevedo, “*Lectures on superstring phenomenology*”, arXiv:hep-th/9603074.
- [4] R. Bousso and J. Polchinski, JHEP **0006** (2000) 006 [arXiv:hep-th/0004134].
- [5] S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde and S. P. Trivedi, Phys. Rev. D **68** (2003) 046005 [arXiv:hep-th/0301240].
- [6] J. Polchinski, “*The Cosmological Constant and the String Landscape*”, arXiv:hep-th/0603249.
- [7] W. Lerche, D. Lüst and A. N. Schellekens, “*Chiral Four-Dimensional Heterotic Strings From Selfdual Lattices*”, Nucl. Phys. B **287**, 477 (1987).
- [8] S. Weinberg, “*Anthropic Bound On The Cosmological Constant*”, Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 2607.
- [9] F. Denef and M. R. Douglas, “*Distributions of flux vacua*” JHEP **0405** (2004) 072 [arXiv:hep-th/0404116].
- [10] G. W. Gibbons and P. K. Townsend, Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 3754 [arXiv:hep-th/9307049].
- [11] L. Smolin, *The Fate of black hole singularities and the parameters of the standard models of particle physics and cosmology*, arXiv:gr-qc/9404011.
- [12] L. Smolin, *The lifetime of the cosmos*, New York, USA: Oxford Univ. Pr. (1997) .
- [13] A. Strominger, *Superstrings With Torsion*, Nucl. Phys. B **274** (1986) 253.
- [14] H. Kawai, D. C. Lewellen and S. H. H. Tye, *Construction Of Four-Dimensional Fermionic String Models*, Phys. Rev. Lett. **57**, 1832 (1986) [Erratum-ibid. **58**, 429 (1987)].
- [15] I. Antoniadis, C. P. Bachas and C. Kounnas, *Four-Dimensional Superstrings*, Nucl. Phys. B **289**, 87 (1987).
- [16] J.D. Barrow and F.J Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press (1986).
- [17] A. Linde, *Inflation, quantum cosmology and the anthropic principle*, arXiv:hep-th/0211048.