

<https://www.youtube.com/watch?v=rRi48Lws5F4>

So who invented string theory? | Astonishing String Theory lecture

Kdo tedy vynalezl teorii strun? | Úžasná přednáška Teorie strun



Emergence

14,5 tis. odběratelů

2 077 zhlédnutí 5. 1. 2025

Leonard Susskind explaining String Theory

0:10

(01)- I was certainly not the only one but it became fairly clear that these things we were calling hadrons look at spell it out protons neutrons and all their various relatives means things to which today we think of this composite Quark systems that by at that time quarks were already being taught about but only talk about it was pretty obvious to me that hadrons were some sort of composite structures which could spin about their axis which could vibrate and so forth and that was experimental data that you could take a proton and spin it up and make a thing called the Delta 3 halves out of it or you could cause it to vibrate unlike electrons electrons are really Point particles it doesn't make any sense to cause them to vibrate internally so I had been thinking about how to repres and this composites of whatever of whatever what was what was what was going on um I had some ideas but the Turning Point the pivotal uh event was a friend of Yaki ranov who was very close to we had worked on Quant mechanics together now on not on particle physics this young physicist at whitesman Institute by the name of veneziano had invented a solution to the bootstrap problem as it was called bootstrap problem was the problem of the hron SM Matrix or whatever that means and I didn't know what he was talking about he jumped up and down he ran back and forth and he finally wrote a formula in the Blackboard which meant nothing to Yak here it had two gamma functions in the numerator and one gamma function in the denominator very famous formula today at least among the small group of physicists who know what it means the vsan formula and I looked at it I said that's it that's very simple I must be able to figure out what that means I know what a gamma function was it was a good mathematician and I knew that gamma functions had sequences of poles those poles would represent excited rotational vibrating States of whatever it was they were describing I looked at it and I said my God the thing is a harmonic oscillator it's a harmonic oscillator for God's sakes it's got equally spaced levels I had also worked on like what's today called LCB quantization May haveed the the part of it and so I knew how to think about the hamiltonian version of it I said this thing is a harmonic oscillator and I went home and I probably spent a good month fiddling around I did some problems of scattering things off harmonic isolators you know you take a spring you attach it to the ceiling you put an electron on the end of the spring and then you scatter a photon off it I

got things which looked awfully much like the veneziano amplitude although not quite I wrote a paper that was called the harmonic oscillator analogy for it had the basis of of those ideas and while I was writing it I suddenly realized that the get it to come out right to really look like the veneziano amplitude did not have to be a spring but it had to be what we would Now call a string a string is just a lot of little harmonic oscillators connected together to form a chain so I wrote that in as a comment comment added in proof that the right structure seems to be a I don't think I called it a string I think I called it a rubber band or harmonic Continuum or something I thought I was the only one in the world who knew that I was sort of flying thinking my God I'm the only human being in the world who knows this it turned out that there was one more human being who knew it you probably know who it was lembo in some sense when I found out that nambo knew it I was let down I was disappointed on the other hand to be in the same league with the great manoo wow let's now hypothesize or postulate that we can think of particles as strings using the two diim using the two-dimensional analogy with non-relativistic physics to explore those strings as if they were conventional non-relativistic not shoelaces but something closer to rubber R bands

5:02

stretchable uh they can move they can flap they can do all the things that a rubber band and ideal rubber band can do what uh what's the mathematical description of a two-dimensional rubber band which is moving around in two Dimensions let's take our rubber band to be an open rubber band that means somebody took a scissor cut it and uh opened it up let's begin with open string open strings mean strings with two ends there may or may not be something interesting attached to the ends but we're interested more in the strings let's write the physics of a uh of a string what is the what is the energy what is the energy stored in a string all right we can think of the string as a collection of points Point particles which later on we will take limits one of the things we will do when we take a limit is we we let the mass of each point go

(01)- Určitě jsem nebyl jediný, ale bylo docela jasné, že tyto věci, kterým říkáme hadrony, to vysvětlují protony neutrony a všechny jejich různé příbuzné mezony věci, ke kterým dnes myslíme tyto složené kvarkové systémy, které v době, kdy se o kvarcích již učilo, ale jen se o nich mluvilo, bylo mi docela zřejmé, že hadrony jsou jakési složené struktury, **které se mohou otáčet kolem své osy, které mohou vibrovat a tak dále**, a to byla experimentální data, která si můžete vzít proton a roztočte ho a vytvořte z něj věc zvanou Delta 3 poloviny, jinak byste mohli způsobit, že bude vibrovat, na rozdíl od elektronů, **elektrony jsou ve skutečnosti ?? bodové částice**, nedává žádný smysl způsobovat jejich vnitřní vibrace, takže jsem o tom přemýšlel jak ztvárnit a toto skládat z čehokoli, co bylo, co se dělo, měl jsem nějaké nápady, ale zlomový bod, klíčová událost, byl přítel **Yakiho Ranova**, který byl velmi blízko, pracovali jsme na Quantové mechanice spolu teď ne o fyzice částic tento mladý fyzik z Whitesman Institute jménem **Veneziano** vynalezl řešení problému **bootstrap, ??** jak se tomu říkalo bootstrap problém byl problém hron SM Matrix nebo co to znamená a já ne věděl, o čem mluvil, skákal nahoru a dolů, běhal tam a zpět a nakonec napsal na tabuli vzorec, který pro Yaka nic neznamenal, zde měl dvě gama funkce v čitateli a jednu gama funkce ve jmenovateli dnes velmi slavný vzorec alespoň mezi malou skupinou fyziků, kteří vědí, co to znamená, vzorec vsan a podíval jsem se na to, Řekl jsem, že to je to, co je velmi jednoduché, musím být schopen přijít na to, co to znamená, vím co gama funkce to byl dobrý matematik a věděl jsem, že **gama funkce mají sekvence pólů**, tyto póly by představovaly **vzrušené rotační**

vibrační stavy čehokoli, pokud slova v této větě nejsou v přeneseném významu něco jiného než slovník říká, pak „cokoliv“ může být o balíček smotaných dimenzí, proč ne ??? ?!!!! co popisovaly, podíval jsem se na to a řekl jsem své Bože, ta věc je **harmonický oscilátor**, na papíře je to něco jiného než v realitě kosmu... probouha, je to harmonický oscilátor, má stejně rozmístěné úrovně, také jsem na tom pracoval, jako je to, čemu se dnes říká LCB kvantizace. Má to část, a tak jsem věděl, jak přemýšlet o jeho hamiltonovské verzi. Na papíře „harmonický oscilátor v hamiltonovské verzi“ je co ? A ve vesmíru je to co?? Řekl jsem, že tato věc je harmonický oscilátor a šel jsem domů a pravděpodobně jsem strávil dobrý měsíc šmejděním, udělal jsem nějaké problémy s rozptylováním věcí z harmonických izolátorů, víte, že si vezmete pružinu, připevníte jí ke stropu, na konec pružiny umístíte elektron což je **bod** a poté z něj rozptýlíte foton. Jak?? Rovnici znám. https://www.hypothesis-of-universe.com/docs/eb/eb_022.pdf a v dokumentu str. 11 example 7.

Škoda, že jsem si neopsal zdrojovou adresu, ale doufám že mi čtenář věří že fyzika uvádí \diamond elektron a pozitron dají foton a graviton

$$e^- + e^+ = \gamma^- + \Gamma$$

dosadím tam své „vzorečky“ \rightarrow

$$\frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1} \cdot \frac{x^2 \cdot t^1}{x^2 \cdot t^2} = \frac{x^3 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^3} \cdot \frac{x^0 \cdot t^2}{x^1 \cdot t^1} \quad 7 \ 7$$

$$\frac{x^2 \cdot t^1}{x^2 \cdot t^2} \cdot \frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^3} = \frac{x^1 \cdot t^1}{x^1 \cdot t^1} \quad 7 \ 7$$

škoda že jsem si neopsal zdrojovou adresu, ale doufám že mi čtenář věří že fyzika uvádí \rightarrow **elektron a pozitron dají foton a graviton**

$$e^- + e^+ = \gamma^- + \Gamma$$

dosadím tam své „vzorečky“ \rightarrow

$$\frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1} \cdot \frac{x^2 \cdot t^1}{x^2 \cdot t^2} = \frac{x^3 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^3} \cdot \frac{x^0 \cdot t^2}{x^1 \cdot t^1} \quad 7 \ 7$$

$$\frac{x^2 \cdot t^1}{x^2 \cdot t^2} \cdot \frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^3} = \frac{x^1 \cdot t^1}{x^1 \cdot t^1} \quad 7 \ 7$$

????????????????????????????????????

Mám věci, které se strašně podobaly venezianovi amplitudě, i když ne tak docela jsem napsal článek, kterému se říkalo analogie harmonického oscilátoru měl základ těchto myšlenek, a když jsem to psal, najednou jsem si uvědomil, že to, aby to vypadalo správně, aby to opravdu vypadalo jako venezianová amplituda, nemusí být pružina, ale muselo to být to, co bychom nyní nazvali struna. **Struna je jen spousta malých harmonických oscilátorů spojených dohromady, aby vytvořily řetězec,**

$$n + {}^{235}\text{U}_{92} = {}^{141}\text{Ba}_{56} + {}^{92}\text{Kr}_{36} + 3n$$

$$n^1 \cdot p^{92} n^{143} e^{-92} = p^{56} n^{85} e^{-56} \cdot p^{36} n^{56} e^{-36} n^3$$

$$p^{92} = p^{92}$$

$$n^{144} = n^{144}$$

$$e^{-92} = e^{-92}$$

$$\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2}\right)^{92} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3}\right)^{143} \cdot \left(\frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1}\right)^{-92} = \left(\frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2}\right)^{56} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3}\right)^{85} \cdot \left(\frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1}\right)^{-36} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2}\right)^{36} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3}\right)^{56} \cdot \left(\frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1}\right)^{-36} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3}\right)^3$$

$$n^1 + {}^{235}(p \quad n \quad e^-)_{92} = {}^{141}(p \quad n \quad e^-)_{56} + {}^{92}(p \quad n \quad e^-)_{36} + 3n$$

$$\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2}\right)^{92} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3}\right)^{143} \cdot \left(\frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1}\right)^{-92} = \left(\frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2}\right)^{56} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3}\right)^{85} \cdot \left(\frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1}\right)^{-56} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2}\right)^{36} \cdot \left(\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3}\right)^{56} \cdot \left(\frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1}\right)^{-36}$$

$$n^1 + {}^{235}(p \quad n \quad e^-)_{92} = {}^{141}(p \quad n \quad e^-)_{56} + {}^{92}(p \quad n \quad e^-)_{36}$$

takže jsem to napsal jako komentář přidaný jako důkaz, že správná struktura se zdá být a nemyslím si, že jsem to nazval struna, myslím, že ano. Říkal jsem tomu **gumička nebo harmonické kontinuum nebo tak něco**. https://www.hypothesis-of-universe.com/docs/c/c_426.jpg Myslel jsem si, že jsem jediný na světě, kdo ví, že tak trochu létám a myslel jsem si, můj Bože, jsem jediná lidská bytost na světě, která to ví, ukázalo se, že existuje další lidská bytost, která to znala, pravděpodobně víte, kdo to byl **Leibo** v určitém smyslu, když jsem zjistil, že to **Nambo** ví, **byl jsem zklamaný, já ne. Já jsem stále jediný na světě který ví „jak se vyrábí elementární částice“ → balíčkováním dimenzí**, na druhou stranu jsem byl zklamaný, že jsem ve stejné lize s velkým **manoo**, **wow**, pojďme nyní předpokládejme nebo postulujme, **že částice můžeme považovat za struny** pomocí těchto dvou diim pomocí dvourozměrné analogie s nerelativistickou fyzikou k prozkoumání těchto strun, jako by to byly konvenční nerelativistické ne tkaničky, ale něco bližšího gumičkám R 5:02

roztžitelné uh mohou se pohybovat mohou klopat **mohou dělat všechny věci, které umí gumička** a ideální gumička to, co uh jaký je matematický popis dvourozměrné gumičky, která se pohybuje ve dvou dimenzích, vezměme si naši gumičku být otevřená gumička, **což znamená, že někdo vzal nůžky, přestříhl to a otevřel to, začneme otevřeným provázkem, otevřené struny znamenají struny se dvěma konci**, na koncích může nebo nemusí být něco zajímavého, ale my jsme zajímáme se více o struny pojďme napsat fyziku uh struny co je to **co je to energie co je to energie uložená ve struně** v pořádku, můžeme si strunu **představit jako soubor bodů**. **Bodové částice**, které později budeme vzít limity jednou z věcí, které uděláme, když vezmeme limit, **je, že necháme hmotnost každého bodu jít**

(02)- to zero that's because uh we're going to have an the whole string has a has a finite Mass we're going to think of it as being a collection of a virtual Infinity of Point masses it had better be that in taking the limit we let the mass of each point go to zero all right but what's uh what's the energy of this the energy is going to be proportional the kinetic energy it'll be the sum of all the points of X I do sared these are two-dimensional now so we could write this as X + Y do^ 2 that's the I point ided by two and we might put here in a mass of the I particle which later on we're going to let go to zero but let's let's not be too uh I'll just tell you how to do the the Continuum limit I'll show you how to do it I'll just tell you how to do it all right what are we missing out of this formula interaction interactions yeah uh these points are

attracting each other if they weren't attracting each other they would just fly apart they're forming a string they are in addition to the points we have to put in the little springs that connect them so think of it as a chain of little balls and little Springs can you see the Springs all right little balls and little Springs um let's just call this x_i x_{i+1} now stands for $X^2 + Y^2$ okay what is the potential energy between the points the potential energy is a sum also over all neighboring pairs so there's another sum of i here there's a spring constant let's just call it K all the mass points have the same mass there's a spring constant there and what is the potential energy between a pair of points it'll be proportional to the distance between them $x_i - x_{i+1}$ squared probably a two there this is Hook's law this is Hook's law the energy stored in a stretched spring is proportional to the distance of stretching squared that's the hooks law uh formula for the now what happens when you go to the Continuum limit in other words you let the points get denser and denser and denser more and more of them you have to do two things you have to let the mass of each one go to zero and you have to also let the spring constant what it is you want the spring constant to get big or small big big can you you know why supposing you take a rubber band and you take a rubber band uh a big long piece of rubber band and you stretch it it's easy to stretch now take two points very close to each other and try to stretch them that same distance much harder okay so the spring constant gets big and the mass gets small but in the end what you get just take it from me what you get is of course an integral represent uh uh an integral replacing the sum the integral is over a parameter along the string you have to introduce a mathematical parameter along the string we can call that parameter we'll give it a name σ σ goes from one end of the string where we can arbitrarily say it's zero so σ is zero at this end and at

10:01

the other end we can arbitrarily say σ is equal to π I could have taken it to be one I could have taken it to be seven it doesn't matter uh it will be useful to think to call it π the reason is later on we're going to study closed strings which go all the ways around in a loop and it's nice to say they go from 0 to 2π that's all but uh they go from zero to π so this sum over the mass points is going to be an integral from 0 to π $\int_0^\pi d\sigma$ this is adding them all up and we're going to have the kinetic energy of the little element of string at Point σ have a continuous string now we take a little element at Point σ we take it velocity squared and divide by two and what about this term over here uh I've I've I've chosen the mass to go in the appropriate way I'm dropping the mass here by the time you finished um you can absorb the mass into something else doesn't matter what it's just \dot{x} it's clearly kinetic energy all right what about this term here what's that going to look like how about $x_i - x_{i+1}$ what you replace that with derivative derivative this is like the derivative of x with respect to σ squared so the other term here will be derivative of x with respect to σ this is derivative of x with respect to time this is derivative of x with respect to σ squared this is the energy of the string if I wanted to write the \mathcal{L} you all remember what a \mathcal{L} is energy is kinetic energy plus potential energy \mathcal{L} is kinetic energy minus so if I wanted the \mathcal{L} it would be this if I wanted the energy it would be with a plus sign okay I'll write the energy we'll write the energy hamiltonian plus let's focus for a little bit on a string which happens to have no overall Center of mass Motion in the two dimensions in the XY plane we're coming back now

.....

(02)- na nulu. Je to proto, že uh, budeme mít celý řetězec má konečnou hmotnost, budeme o tom uvažovat jako o sbírce virtuálních hmotností nekonečna bodů, mělo by být lepší, že v

vezmeme-li limit, necháme hmotnost každého bodu jít na nulu, Není nutné aby elementární částice byl bod!...!! Není to bod, je to časoprostorová lokalita, je to >balíček< svinutých dimenzí... ale jaká je energie tohoto? Hmotnost je vlastnost „balíčků“ tedy elementárních částic a tak proč by nemohla být i energie „vlastnost“ hmoty?? energie bude úměrná kinetické energii, bude to součet všech bodů X , které udělám, ale tyto jsou nyní dvourozměrné, jenže mohou být 3+3 rozměrné a až 9+8 rozměrné, proč ne?! takže to můžeme napsat jako $X + Y$ do² to je bod. Už 25 let vedu nahlas názor, že Teorie strun je kousíček od mé HDV, že pokud tito vědci strunaři změní názor a nebudou trvat na tom, že struny jsou „z Ničeho“ a budou konečně uvažovat jako já že struny jsou – vlastně – dimenze, fyzikální dimenze, artefakty „z masa a kostí“, pak moje HDV bude logicky Teorií strun, anebo Teorie strun mojí HDV – to spíš protože já řeším při HDV další otázky kosmologie. A já jsem mohutně vpředu se svou myšlenkou, modelem, <https://www.hypothesis-of-universe.com/index.php?nav=e> než jsou strunaři, kteří 40let tápou = přešlapují na místě, je těch borců 10 milionů, co na TS pracují, mají vybavené kanceláře a laboratoře, elektřinu + další náklady, mají mzdu a né ledajakou (já za 43 let své dřiny nedostal ani patnáct korun...naopak), mají studium zdarma, a další pomocné aparáty, překladatele, mohou mezi sebou konzultovat, a bůh ví co a...a přitom jsou pozadu o 3 míle, než jsem já. A já..!! jsem ještě pronásledován urážkami, ponižováním a naháněním do psychiatrických mučiren. To je tristní. I identifikován dvěma a mohli bychom sem vložit hmotnost částice I, kterou později necháme jít na nulu, ale pojďme, nebud' příliš uh, jen ti řeknu, jak udělat limit kontinua. Ukážu ti, jak to udělat, řeknu ti, jak to udělat všechno správně, co nám chybí z tohoto vzorce interakce, interakce yeah uh tyto body přitahují jeden druhého, kdyby se navzájem nepřitahovali, prostě by se rozletěli od sebe tvoří provázek jsou navíc k bodům, které musíme vložit do malých pružin, které je spojují, takže si to představte jako řetěz malých kuliček a proč si už od r. 2000 kdy já dal HDV na internet, nechcete představit ideu dvouveličinového vesmíru. To, že hmota je odvozená veličina, protože je postavena z dimenzí hlavních nezadatelných reálných veličin, a Little Springs vidíš Springs v pořádku malé koule a malé Springs ehm, říkejme tomu x z i^2 x z i^s nyní znamená X x^2 X do² + Y do² dobře, ← to čumím jaký oobrovský je to výdobytek pro vědu za 40 let jaká je potenciální energie mezi body a potenciální energie je součet i přes všechny sousední páry, takže je tu další součet. I tady je konstanta pružiny nazvěme to K všechny hmotné body mají stejnou hmotnost?? je tam pružinová konstanta a jaká je potenciální energie mezi dvojicí bodů bude to úměrné vzdálenosti mezi nimi $x_i - x_{i+1}$ na druhou, pravděpodobně dvojku toto je Hookův zákon, toto je Hookův zákon, energie uložená v natažené pružině je úměrná vzdálenosti natažení na druhou úúúžasná to věda a výdobytek za 40 let... to je zákon o hácích uh vzorec pro teď, co se stane?!, když přejdete na limit kontinua, jinými slovy necháte body, aby byly hustší a hustší a stále hustší, stále více z nich musíte udělat dvě věci, musíte nechat hmotnost každého z nich jedna jdi na nulu a musíš také nechat konstantu pružiny co to je chceš, aby konstanta pružiny byla velká nebo malá velká velká víš proč, když si vezmeš gumičku a vezmeš gumičku uh velký dlouhý kus z gumičky a vy natáhnout to je snadné natáhnout teď vezměte dva body velmi blízko u sebe a pokuste se je natáhnout na stejnou vzdálenost mnohem tvrději, dobře, takže konstanta pružiny se zvětší a hmotnost se zmenší, ale nakonec to, co získáte, vezměte si to ode mě, dostanete je samozřejmě integrál představuje uh uh integrál nahrazující součet integrál je nad parametrem podél řetězce musíte zavést matematický parametr podél řetězce můžeme tento parametr nazvat, dáme mu jméno Sigma. úúúžasná to věda a výdobytek za 40 let... Sigma pochází

jeden konec provázku, kde můžeme libovolně říci, že je to nula, takže Sigma je na tomto konci a na nule

10:01

na druhém konci můžeme libovolně říci, že Sigma se rovná Pi. Mohl jsem to vzít za jedničku Mohl jsem to vzít za sedm, na tom nezáleží u \hbar , bude užitečné přemýšlet o tom, že tomu budeme říkat Pi, důvod je později. Budu studovat uzavřené struny, které se ve smyčce pohybují dokola, a je hezké říci, že jdou od nuly k 2π , **to je vše**, **to je hodně málo (za 40 let)** ale jdou od nuly k π , takže tento součet nad hmotnostními body bude integrál od 0 k π D Sigma je to sečteno všechny a budeme mít kinetickou energii malého prvku struny v bodě Sigma mít souvislou strunu nyní vezmeme malý prvek v bodě Sigma vezmeme jej na druhou, rychlost a vydělíme dva a co tenhle termín tady u \hbar , mám, vybral jsem si hmotu tak, aby šla vhodným způsobem, upustím hmotu sem, než skončíte, můžete hmotu absorbovat do něčeho jiného. Je jedno co je to jen X do s \hbar je to jasně kinetická energie v pořádku co tento termín zde jak to bude vypadat co takhle $x_i - x_i + 1$ co nahradíš derivací derivací je to jako derivace x vzhledem k Sigmě na druhou, takže jiný člen zde bude derivace x vzhledem k Sigmě toto je derivace x vzhledem k času toto je derivace x vzhledem k Sigmě na druhou toto je energie struny, kdybych chtěl napsat Iran you všichni si pamatujte, co Iran je energie je kinetická energie plus potenciální energie Iran je kinetická energie mínus, takže kdybych chtěl Iran, bylo by to toto, kdybych chtěl energii, bylo by to se znaménkem plus dobře, napíšu energii, kterou napíšeme napište hamiltonovskou energii a zaměříme se na chvíli na strunu, která náhodou nemá celkový pohyb těžiště ve dvou dimenzích v rovině XY, kam se teď vracíme

.....

(03)- to here what we're going to do is use a model for a relativistic string which is simply based on this kind of infinite momentum thinking but in which there are only two x's the two x's moving in the u \hbar in the direction perpendicular to the motion so this could be called X and Y but I'll just call it x. s \hbar it really consists of X do s + y do \wedge s this one consists of DX by D Sigma s \hbar plus DX plus d y by D Sigma s \hbar oh sorry there is a two two is important u \hbar I chose K in such a way to make sure that when I got to the final Continuum limit the coefficient was one remember it's something that has to that has to vary as you vary the spacing and u \hbar it can be chosen u \hbar in such a way as to make this u \hbar and this is the conventional energy of a vibrating string it has two terms kinetic and potential potential proportional to the stretching this is this the XD Sigma is the stretching of the string okay I want to point out one interesting fact this hamiltonian here or this expression for energy is the generalization of this expression here for a system of particles which also has a interaction between them but the whole thing the whole object it may be V vibrating and doing things but the whole object is an object we can call it a particle who's to say it's not a particle u \hbar protons and neutrons have spin they rotate there's all sorts of internal motions in particles we know there are internal motions of particles internal motions of atoms internal motions of quirks inside protons and neutrons u \hbar the best bet would be there are all sorts of internal motions in every particle so this stringy

15:01

vibrations and internal motions and so forth that perhaps not perhaps but would add up to all the internal Motion in the particle all the internal energy in the particle the internal energy would be the contributions to the energy from the potential stretching and from the relative motion of the different parts the overall motion was separate that out soon enough but the

overall motion of the string the center of mass of it that would just be treated as the as the position of the particle but the relative stretching and the relative vibration that's internal energy so when we calculate the internal energy of this particle what should we relate it to we should relate it not to the mass but to the mass squared in this correspondence it's not an analogy it's an exact statement about the properties of uh relativity there a a very precise mathematical statement which I won't make now but there was a uh there was an exact sense in which fast moving systems are completely relative non-relativistic in the two-dimensional sense what would the internal energy correspond to it would correspond not to the mass of the particle but to the mass squared so for for a string at rest think of a string which has no Motion in the uh in the XY plane all it's doing is vibrating and it has internal energy that internal energy has to be identified with the square of the mass of the entire assembly of constituents of the string if the constituents of the string are adding up something that we want to call a particle then that particle has a mass squared which is the sum of all of the internal energies inside the particle now this is an interesting fact we get Mass squared for the energy of a particle in this framework this is interesting this is exciting another fact another fact is that a string is not so different than a spring if you look at the Spectrum of energies of a string but the basic fact about the quantization of it is that the string is a collection of Springs and springs have quantized energy and what's the formula for the energy of a quantum mechanical oscillator an integer multiple of something each time you increase the energy of of a spring or a string the internal energy by one unit increases the mass squared by one unit for the moment it's just the mass of the entire string the entire including its internal energy including its stretching energy all of the energies that you would normally add up to find MC square to find the rest Mass that's what this is here right in fact if we increase the angular momentum by one Quantum then the quantized energy the Quantum of energy that would be introduced would be a Quantum of m^2 not a Quantum of M there's another interesting fact here um supposing you took a string which was not moving but which you stretched out which you stretched out to a certain uh length Okay how much energy would it have well then all of its energy would be potential energy not kinetic energy let's calculate what it would be how big is the XD Sigma well if you stretched that out uniformly then the change in X along the length of it would just be the length of the string L would just be we stretching it out to a physical distance L we stretch it out to a physical distance L over a distance from 0 to π right

.....

(03)- k tomu použijeme model pro relativistický řetězec, který je jednoduše založen na tomto druhu myšlení s nekonečnou hybností, ale ve kterém jsou pouze dvě x a dvě x se pohybují v uh ve směru kolmo na pohyb, takže by se to dalo nazvat X a Y, ale já tomu budu říkat x. s^2 opravdu se skládá z $X^2 + y^2$ do s^2 tohle se skládá z $DX^2 + dY^2$ plus $DX^2 + dY^2$ od $D\Sigma^2$ oh promiň, že jsou dvě dvě, je důležité uh. Zvolil jsem K takovým způsobem, abych se ujistil že když jsem se dostal ke konečnému limitu kontinua, koeficient byl jeden, pamatujte si, že je to něco, co se musí měnit, jak měníte rozestupy a uh, lze to vybrat tak, aby tohle je konvenční energie vibrující struny má dva pojmy kinetický a potenciální potenciál úměrný natažení tohle je XD Sigma je natahování struny v pořádku chci upozornit na jeden zajímavý fakt tenhle hamiltonský tady nebo tady výraz pro energii je zobecnění tohoto výrazu zde pro systém částic, který mezi sebou také interaguje, ale celá věc celý objekt to může být V vibrující a dělat věci, ale celý objekt je objekt, můžeme mu říkat částice kdo by řekl, že to není částice uh protony a neutrony se otáčejí, rotují, v částicích jsou nejrůznější vnitřní pohyby, o kterých víme, že existují vnitřní pohyby částic vnitřní pohyby atomů vnitřní

pohyby vtípků uvnitř protonů a neutronů uh nejlepší sázka by byla tam jsou všechny druhy vnitřních pohybů v každé částici, takže je to vláknité

15:01

vibrací a vnitřních pohybů a tak dále, že možná ne, ale sčítaly by se s veškerým vnitřním pohybem částice všechna vnitřní energie částice, vnitřní energie by byla příspěvky k energii z potenciálního roztažení a z relativního pohybu částice. Různé části celkový pohyb byl oddělený, že ven dost brzy, ale celkový pohyb struny její těžiště, které by bylo považováno za polohu částice, ale relativní natažení a relativní vibrace, což je vnitřní energie, takže když vypočítáme vnitřní energii této částice k čemu bychom to měli vztáhnout, měli bychom to vztáhnout ne k hmotnosti, ale ke druhé mocnině v této korespondenci, **není to analogie, je to přesné tvrzení o vlastnostech relativity, velmi přesné matematické tvrzení, které teď nebude, ha, ha...** ale Existoval přesný smysl, ve kterém jsou rychle se pohybující systémy zcela relativní nerelativistické ve dvourozměrném smyslu, čemu by odpovídala vnitřní energie, neodpovídala by hmotnosti částice, ale hmotnosti na druhou. **Pro strunu v klidu ?? že by existovala struna v klidu?? Haq, ha...** si představte strunu, která nemá žádný pohyb v uh v rovině XY **vše, co dělá, je vibrace** a má vnitřní energii, kterou je třeba ztotožnit s druhou mocninou hmotnosti celé sestavy složek struna, **pokud** složky struny sčítají něco, co chceme nazvat částicí, pak tato částice má hmotnost na druhou, což je součet všech vnitřních energií uvnitř částice, nyní je to zajímavý fakt, dostaneme hmotnost na druhou energie a částice v tomto rámci je to zajímavé, to je vzrušující další fakt, další fakt je, že struna není tak odlišná od pružiny, když se podíváte na spektrum energií struny, ale základní fakt o její kvantizaci je, že **struna je sbírka pružin a pružin má kvantovanou energii** 😊 a jaký je vzorec pro energii kvantového mechanického oscilátoru celočíselný násobek něčeho pokaždé, když zvýšíte energii **pružiny nebo struny** vnitřní energie o jednu jednotku zvýší hmotnost na druhou jedna jednotka v tuto chvíli je to jen hmotnost celé struny, celku včetně její vnitřní energie včetně její napínací energie všechny energie, které byste normálně sečetli, abyste našli MC čtverec, abyste našli zbytek Hmotnost, to je to, co tady ve skutečnosti je pokud zvýšíme moment hybnosti o jedno kvantum, pak kvantovaná energie, kvantum energie, které **by bylo zavedeno,** **by bylo** kvantum m squ ne kvantum M , je tu další zajímavý fakt um **předpokládáme** vzal jsi provázek, který se nehýbal, ale který jsi natáhl, který jsi natáhl na určitou uh délku. Dobře, kolik energie by měl, dobře, pak **by** veškerá jeho energie byla potenciální energie, ne kinetická energie.?? Pojďme spočítat, jaká **by** byla, jak velká je XD Sigma, dobře, **kdybyste** ji natáhli rovnoměrně, pak **by** změna v X po její délce byla pouze délkou struny L **by** jen bylo, **kdybychom** ji natáhli na fyzickou vzdálenost L , natáhli **bychom** ji na fyzickou vzdálenost L na dálku od 0 do π vpravo

.....

(04)- all right so the derivative of x with respect to Σ would be something like L / π I don't care about the π s right now they're not what's what's interesting dx by $d\Sigma$ would just be proportional to the length of the string okay if you stretched it out by distance L and divided it by the range of Σ from 0 to π that would give you Dx by $d\Sigma$ and so we can say that dx by the Σ is proportional to the length of the string and the X by the Σ squared would just be the square of the length of the string right this is

20:01

Hook's law this is Hook's law for a string if you stretch it out the distance L the energy stored in it nonrelativistically will be $l s$ but that's what has to equal the mass squared now we know

something interesting about how about the energetics of the string if we were to study it in the rest frame in the rest frame of the string the energy of the string is the mass we got from Mass to mass squared by boosting the string but if we went back now and we said look wait a minute we know $E = mc^2$ that's rest Mass what is the rest mass of the string and the answer is that the rest mass is proportional to this is a proportionality Factor proportional to its length in other words this string has the property that the energy if you think about it in its rest frame if you stretch it out the distance L it will have an energy which will grow with L and be proportional to L in the rest frame it doesn't look like a hooks law string at all it looks like a different kind of string whose energy is proportional to its length well that's very interesting because it fits with another picture it fits with the picture which I described before of lines of flux connecting quarks and antiquarks lines of flux would produce I slice them through like this they would produce a patch of electric or magnetic field here it doesn't matter whether it's electric or magnetic lines of flux in a tube like this would produce a magnetic or an electric field in here electric Fields have energy and the energy density in them depends on the field the energy density along this long tube of flux would be uniform if the number of flux lines passing through this little area is the same as number passing through this little area and so forth the field strength would be uniform along this tube of flux here this is in fact a property of tubes of magnetic flux and superconductors and so forth in superconductors uh in superconductors you don't have of course monopoles in superconductors but you can have long lines of magnetic flux and they have the property that the magnetic field is uniform along them and therefore the energy density is uniform along them that means that the energy is proportional to their L this is a common thing in uh in field Theory and condensed matter physics and a variety of different context where where field energy in a field forming a long string is proportional to the length of the string not the length Square it's a different kind of string another way to think about it is that the string is made up of a lot of little particles but as you pull on it and separate the distances here no particles form in between so as to keep the number of particles per unit length fixed that's another way to think about these long flux lines that they're uniform along their length and as you pull them apart more particles form to fill the gaps then in that situation it would also be true that the energy per unit length would be fixed and the energy would be proportional to the length this is by now actually an experimental fact about uh about hadrons that you can spin them up you can stretch them and they have the property that the energy per unit length is fixed they have a it's called a string tension the string tension is a constant that would not be the case in an ordinary hooks law if you stretch them but that but this is the picture in the rest frame in the rest frame the energy of the string is proportional to its length in the infinite momentum frame where the physics is all non-relativistic the energy is proportional to the square of the length like hooks law so these two kinds of strings hooks law and flux tube are related to each other some sense they're just the same object being described in two different reference frames one at rest and one uh just if you had an ordinary rubber band

25:02

and it was vibrating in with almost relativistic speeds in one no no no wait ordinary rubber bands if they vibrate with relativistic speed we haven't got the vaguest idea how to describe them we don't want to do that no uh We've we've we've made an indirect deduction we've made an indirect deduction first first half of the deduction was in the infinite momentum

.....

(04)- v pořádku, takže derivace x vzhledem k Sigma by byla něco jako L / π Koláče mě teď nezajímají, nejsou to, co je zajímavé dx by D Sigma by byla úměrná délce struny je v pořádku, pokud ji natáhnete vzdáleností L a vydělíte ji rozsahem Sigma od 0 do π , což vám dá $Dx \times D \text{Sigma}$, takže můžeme říci, že dx sigma je úměrné délce struny a $X \text{ u sigma}$ čtverce by bylo jen druhou mocninou délky struny, správně,

20:01

Hookův zákon toto je Hookův zákon pro strunu, pokud ji natáhnete na vzdálenost L, energie v ní uložená nerelativisticky bude $l s$, ale to je to, co se musí rovnat hmotnosti na druhou, nyní víme něco zajímavého o energetice struny, pokud kdybychom to studovali v klidovém rámci ve zbývajícím rámci struny, energie struny je hmotnost, kterou jsme dostali z hmoty na druhou, hmotu umocněnou zesílením struny, ale kdybychom se teď vrátili a řekli bychom, podívej se, počkejte minutu, víme mc^2 to je klidová hmotnost co je klidová hmotnost struny a odpověď je, že klidová hmotnost je úměrná tomu je úměrnost. Faktor úměrný její délce jinými slovy tato struna má vlastnost, že energie, pokud se nad tím zamyslíte když ji natáhnete na vzdálenost L, bude mít energii, která poroste s L a bude úměrná L v klidovém rámu, vůbec to nevypadá jako provázek zákona o háčích, vypadá to jako jiný druh struny, jejíž energie je úměrná jeho délce, dobře, to je velmi zajímavé, protože se hodí k jinému obrázku, hodí se k obrázku, který jsem popsal dříve o čarách toku spojujících zvláštnosti a antikvarky, které by vytvořily čáry toku, takto bych je prořízl, vytvořily by záplatu elektrického nebo magnetického pole zde nezáleží na tom, zda se jedná o elektrické nebo magnetické čáry toku v trubici, jako je tato, vytvořily by zde magnetické nebo elektrické pole elektrické pole mají energii a hustota energie v nich závisí na poli hustota energie podél této dlouhé trubice toku by byla stejnoměrná, kdyby počet siločar procházejících touto malou oblastí byl stejný jako počet procházejících touto malou oblastí a tak dále by intenzita pole byla stejnoměrná podél této trubice toku, zde je to ve skutečnosti vlastnost trubic magnetického toku a supravodičů a tak dále v supravodičích uH v supravodičích samozřejmě nemáte monopoly v supravodičích, ale můžete mít dlouhé čáry magnetického toku a mají tu vlastnost, že magnetické pole je podél nich rovnoměrné a proto je hustota energie podél nich stejnoměrná, což znamená, že energie je úměrná jejich L, to je běžná věc v teorii pole a fyzice kondenzovaných látek a v řadě různých souvislostí, kde je energie pole v poli tvořícím dlouhý řetězec úměrné délce struny ne délce. Čtverec je to jiný druh struny jiný způsob, jak o tom přemýšlet, je, že struna se skládá z mnoha malých částic, ale když za ni taháte a oddělujete vzdálenosti, žádné částice se netvoří mezi tím, aby číslo zůstalo zachováno pevných částic na jednotku délky, to je další způsob, jak si o těchto dlouhých čarách toku myslet, že jsou stejnoměrné po své délce a jak je od sebe odtahujete, tvoří se další částice, aby zaplnily mezery, pak by v této situaci také platilo, že energie na jednotkovou délku by byla pevná a energie by byla úměrná délce, to je nyní ve skutečnosti experimentální fakt o hadronech, že je můžete roztočit, můžete je natáhnout a mají tu vlastnost, že energie na jednotku délky je pevná. Mají to se nazývá řetězec napětí napnutí tětiny je konstanta, která by v běžném zákoně o háčích nenastala, pokud je natáhneš, ale to je obrázek v rámečku v odpočívadle energie tětiny je úměrná její délce v nekonečnu rámeček hybnosti, kde je celá fyzika nerelativistická, energie je úměrná druhé mocnině délky jako zákon háčků, takže tyto dva druhy strun, zákon háčků a indukční trubice spolu souvisejí v určitém smyslu, jsou to jen stejný objekt, který je popsán ve dvou různých odkazech rámy jeden v klidu a jeden uH jen kdybys měl obyčejnou gumičku

25:02

a vibrovalo to téměř relativistickými rychlostmi v jednom ne ne ne čekat obyčejné gumičky pokud vibrují relativistickou rychlostí nemáme ani tušení, jak je popsat, nechceme to dělat ne uh. Máme. Provedli jsme nepřímý odpočet provedli jsme nepřímý odpočet první první polovina odpočtu byla v nekonečné hybnosti

.....

(05)- frame everything is non-relativistic at least in two dimensions ions we use that to discover the fact that the stretched energy of a string which is L^2 because it's described nonrelativistically like a hooks law like a hooks Law Spring is l^2 that is to be related to m^2 indirectly from that we conclude that if we were in the rest frame the energy of the string would be proportional to its length and that's interesting because there's a wide variety of interesting uh string-like objects that occur in field Theory uh not made out of atoms but made out of field uh field configurations which have exactly the same property um all right let's uh let's come back in a few minutes I think uh I think I probably exhausted uh your attention for today but let me well let me summarize let me summarize let me summarize experimental properties of uh of hadrons indicated this kind of uh excitations along a line had we been smart at the time we probably would have realized that this pattern here is the appropriate pattern for Strings whose potential energy is proportional to their length that's something we actually could have deduced directly from here that in fact why am I saying we could have I did uh that uh that the energy grew as the length of such a string that was the consequence of uh of this relationship here all right that was one fact next fact non-relative or relativistic physics in a frame in which everything is moving fast is the same as non-relativistic physics except in one less dimension uh in one less Dimension and so we can try to build a simple theory of relativistic strings by going to such a frame and just using non-relativistic physics but one less Dimension here it is here's the non-relativistic string in two-dimensional space the only thing we have to remember is that wherever we saw energy we have to think of it or internal energy in particular internal energy should be really identified with the square of the mass not the mass okay that if you remember came from the two different expansions if you like one of them was an expansion in which this was the big term and then the whole thing is approximately of Order MC^2 square root of this thing in here the other expansion was a term in which this was big and and then the excess energy was proportional to M^2 not M so when you do that and you go through this little exercise your conclusion is that the hooks law energy of the effective non-relativistic string should be identified with a mass squared which indirectly tells you that the that the rest mass of the string is proportional to its length and finally there are lots and lots of field theory in condensed matter systems which have the same property so that was uh something

29:03

encouraging if you like Am I the only human being in the world who knows this? | Inventing String Theory 😊

.....

(05)- zarámovat vše je nerelativistické alespoň ve dvourozměrných iontech, které použijeme k odhalení skutečnosti, že napnutá energie struny je L^2 kvadrát, protože je popsána nerelativisticky jako zákon háčků jako zákon háčků. Zákon pružiny je l^2 , ?? které má souviset s m^2 . ?? Nepřímo, z toho vyvozujeme, že kdybychom byli v klidovém rámci,

energie struny **by byla** úměrná její délce a to je zajímavé, protože **existuje široká škála zajímavých uh objektů podobných strunám, ? žasnou a přemýšlím, jaké by to mohly být objekty (?)** které se vyskytují v poli. **Teorie** uh, nejsou vytvořeny **z atomů**, ale **vytvořeny z pole** **Rekapitulace: Teorie nejsou vytvořeny z atomů, ale jsou vytvořeny z pole. To jsem nevěděl...** uh konfigurace pole, které mají přesně stejnou vlastnost um, dobře, pojďme se vrátit za pár minut. Myslím, uh, myslím, že **jsem** pravděpodobně **vyčerpaný** **věřím...** ehm, vaši dnešní pozornost, ale **dovolte mi** to shrnout **dovolte mi** to shrnout **dovolte mi** shrnout experimentální vlastnosti uh hadronů naznačovaly tento druh uh excitací podél linie, **kdybychom** byli v té době chytří, pravděpodobně **bychom si** uvědomili, že tento **vzorec je vhodný pro struny**, jejichž potenciální energie je úměrná jejich délce, což je něco, co jsme **ve skutečnosti mohli odvodit přímo odtud**, že vlastně proč říkám, že **jsme to mohli udělat**, uh, že energie rostla s délkou taková struna, která byla důsledkem uh tohoto vztahu zde v pořádku, to byla jedna skutečnost **další skutečnost** nerelativní nebo relativistická fyzika v rámci, ve kterém se vše rychle pohybuje, je stejná jako nerelativistická fyzika, kromě jedné menší dimenze uh v o jednu dimenzi méně, a **tak se můžeme pokusit sestavit jednoduchou teorii relativistických strun tím, a tak že půjdeme do takového rámce kde použijeme jen nerelativistickou fyziku, úúúžasný** ale o jednu dimenzi méně, tady jen nerelativistický řetězec ve dvourozměrném prostoru. Jediná věc musíme si pamatovat, že kdekoli jsme viděli energii, musíme na ni myslet nebo vnitřní energie, zejména vnitřní energie **by měla být** **skutečně ztotožněna s druhou mocninou hmotnosti, nikoli s hmotností**, ano, **pokud** si pamatujete, pochází ze dvou různých expanzí, chcete-li jedna z nich byla expanze, ve které toto byl velký pojem a pak celá věc je přibližně řádu MC ? odmocnina této věci ? zde, další expanze byla výraz, ve kterém toto bylo velké a pak přebytek energie byl úměrný M² ne M, takže když to uděláte a projdete toto malé cvičení, váš závěr je, že **energie hákového zákona co to je ?** efektivní nerelativistické struny **by měla být** identifikována s druhou mocninou hmotnosti, která vám nepřimo říká, **že zbývající hmotnost struny je** úměrná jeho délce a konečně **existuje spousta a spousta teorie pole** v systémech kondenzovaných látek, které mají stejnou vlastnost, **nepochopil jsem** takže to bylo něco

29:03

povzbuzujícího, chcete-li jsem jediná lidská bytost na světě, která to ví? | Vynalézání teorie strun.

.....
JN, 7.1.2025

+