Stephen Wolfram - N*ový druh vědy (velmi stručný průvodce)*

Zdroj: A New Kind of Science, online https://www.wolframscience.com/nks/

Práce Stephena Wolframa: Nový druh vědy (NKS), se snaží přeformulovat teoretické a metodické zákony vesmíru z matematicko-výpočetního hlediska. Wolfram provádí mnoho studií, které vedou k provokativním výsledkům a dohadům, např.:

1. Jednoduchá pravidla mohou generovat složité chování.

2. Všechny moderní matematické metody se mohou zabývat složitými systémy, jako jsou ty v biologii a společenských vědách.

3. Všechny systémy lze vnímat jako výpočty a i ty nejsložitější mají rovnocennost s jednoduchými pravidly.

Používá tyto závěry, aby se pokusil pochopit a formovat jakýkoli druh přirozeného fenoménu. Hlavní teze, kterou vysvětluje, se nazývá Princip výpočetní ekvivalence (PCE). NKS je založena na stovkách počítačových experimentů, které používají Buněčný automat (CA). CA se skládá z mřížky míst s přidruženým stavem, obvykle definované 0 nebo 1, kde každý z těchto stavů souvisí s pravidlem, které obvykle závisí jen na malé části z okolních míst, což je podstatnou součástí PCE. Jedním z nejdůležitějších formulací PCE je, že téměř všechny procesy, které nejsou zjevně jednoduché, lze vnímat jako výpočty rovnocenné složitosti. To znamená, že nezáleží na tom, jak odlišné jsou základní struktury, protože všechny systémy jsou výpočetně rovnocenné. Z tohoto důvodu vyplývá, že tradiční kontinuální matematické modely pro přírodní systémy ve své podstatě nemohou provádět extrémně složité výpočty.

Koncem sedmdesátých let jsem pracoval na kosmologii. Zaujala mne otázka, jak se v našem vesmíru vynořují struktury - od galaxií dolů. Uvědomil jsem si, že to byl vlastně příklad mnohem obecnější otázky: jak se něco složitého vyrábí v přírodě? Existuje mnoho každodenních příkladů - sněhové vločky, turbulentní toky tekutin, formy rostlin a zvířat... a spoustu dalších. Můj první předpoklad byl, že se všemi těmi sofistikovanými výpočty, které znám z částicové fyziky a podobně, budu schopen přijít na to, co se děje s těmito běžnými každodenními systémy. Ale když jsem se o to pokusil, nezdálo se, že by to fungovalo. A postupně jsem zjistil, že s takovým přístupem je zásadní problém.

Když se podíváme na historii, myšlenka použití matematiky a matematických rovnic k pochopení přírody je tak trochu určujícím rysem exaktních věd asi 300 let. A rozhodně to Newtonovi a přátelům vyšlo velmi dobře při zjišťování oběžných drah komet a od té doby pro spoustu věcí. Ale když je chování, na které se člověk dívá, složitější, nezdá se, že by fungovalo tak dobře. A postupně jsem si začal myslet, že právě proto nikdy neexistovala dobrá teorie složitých procesů v přírodě - ve fyzice, zejména v biologii a tak dále. A přemýšlel jsem, jestli by nemohl být způsob, jak jít za celé paradigma používání matematických rovnic při přemýšlení o přírodě.

To bylo počátkem osmdesátých let. A stalo se to tak, že v té době jsem právě vyvinul velký softwarový systém jehož jádrem byl počítačový jazyk. To, co jsem udělal, abych ten jazyk navrhl, bylo, že jsem se pokusil přemýšlet o všech výpočtech, které by lidé mohli chtít udělat - a pak identifikovat základy, které by mohly být spojeny dohromady, aby se tyto výpočty provedly.

Fungovalo to docela dobře. Ale v té době jsem měl představu, že možná – stejně jako jsem byl schopen najít základy pro výpočty, které lidé chtějí dělat – bych mohl být nějakým způsobem schopen najít i základy pro to, co příroda dělá. A uvědomil jsem si, že tyto základy nemusí být založenz jen na tradičních matematických konstruktech.

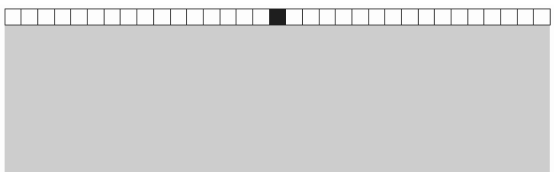
Pokud má být člověk schopen dělat teoretickou vědu, musí předpokládat, že příroda dodržuje nějaká určitá pravidla. Proč by však tato pravidla měla zahrnovat pouze ty druhy konstruktů, které byly vynalezeny v lidské matematice – čísla, exponenciály, počty a tak dále? Nemohou být pravidla nějak obecnější?

V minulosti by nebyl žádný systematický způsob, jak o takových věcech přemýšlet. Ale teď máme počítače, jejichž programy ve skutečnosti zahrnují svévolně obecná pravidla. A myšlenka, kterou jsem měl, byla, že možná druhy pravidel, které mohou být ztělesněny v programech, by mohly být ve skutečnosti to, co příroda používá.

Ale jaké programy by mohly být odpovídající? Ze znalosti tradiční vědy jsem předpokládal, že budou muset být alespoň trochu komplikované. Ale stejně jsem si řekl, že bych měl začít tím, že se budu dívat na opravdu jednoduché programy.

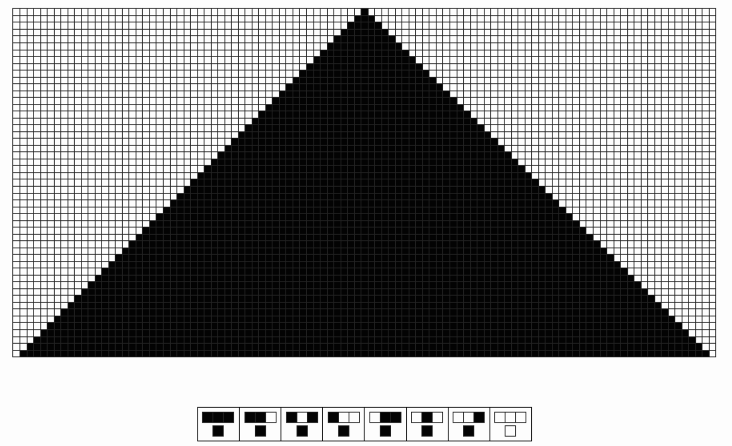
V praktických výpočtech jsme zvyklí na dlouhé, složité programy speciálně nastavené pro konkrétní úkoly. Ale to, o čem jsem chtěl vědět, byly opravdu jednoduché, krátké programy - řekněme náhodně vybrané. Co takové programy dělají? Je to tak trochu nejjednodušší možný počítačový experiment: spouštět opravdu jednoduché programy a vidět, co dělají.

Zde je princip, jak funguje jednoduchý jednorozměrný buněčný automat. Jedna začíná řadou buněk, každá černá nebo bílá.

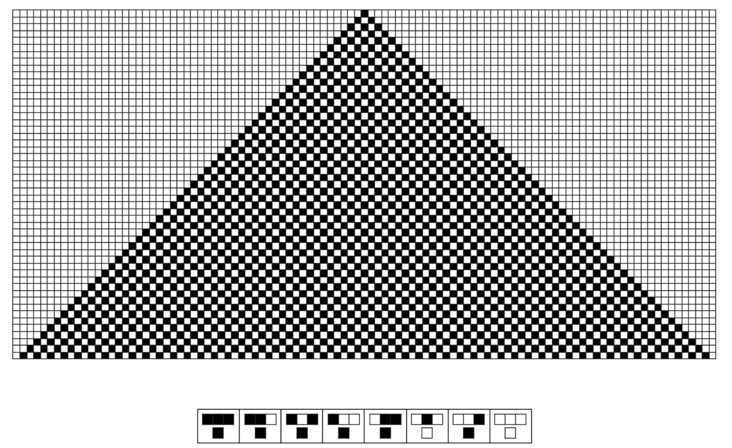


Pak se mobilní automat vyvíjí dolů po stránce, přičemž barva každé buňky na každém kroku je určena určitým pravidlem z barvy buňky a jejích sousedů na kroku předtím.

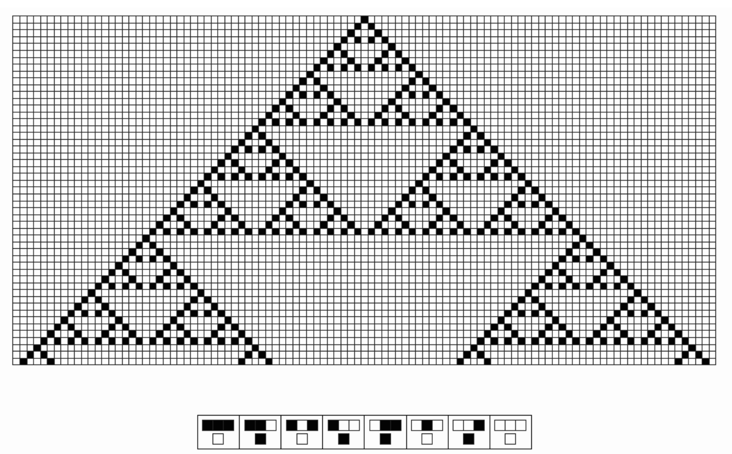
V tomto konkrétním případě je pravidlo opravdu jednoduché. Píše se tu jen, že buňka bude černá, kdykoliv bude ona nebo její sousedé černí v řadě předtím. A stane se to, že dostaneme jednoduchý jednotný černý vzor.



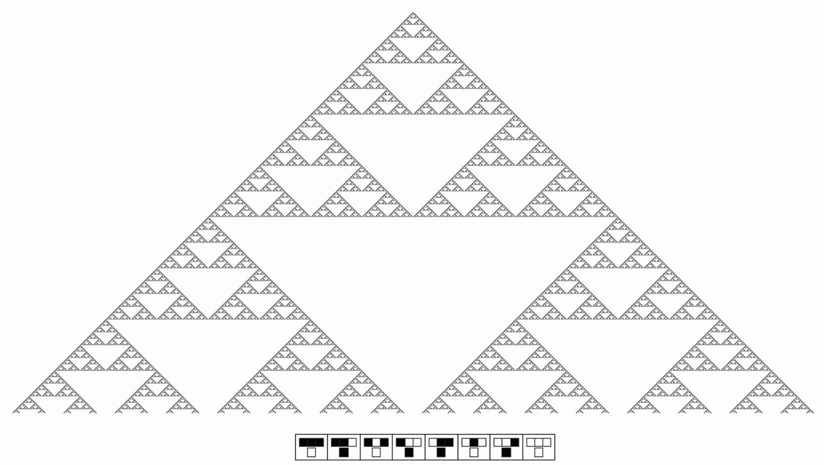
Tuto ikonu můžeme použít v dolní části k reprezentaci pravidla – programu –, který jsme používali. Co se stane, když pravidlo trochu změníme?



Místo toho, abychom dostali jen jednotný černý vzor, dostaneme šachovnici.
Ale zatím nic z toho není nijak překvapující. Používáme velmi jednoduchá pravidla, která dělají jednoduché vzory. Zkusíme jiné pravidlo.

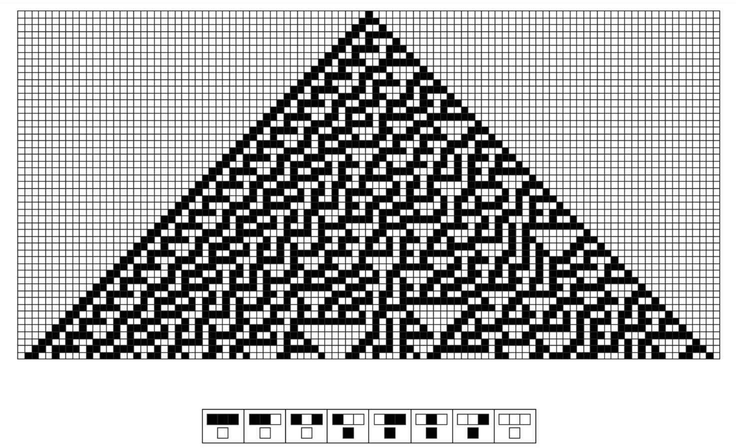


Je to stejné nastavení jako předtím. Ale nezdá se, že by to dělalo nějaký jednoduchý opakující se vzorec. Nechme to proběhnout o trochu déle.

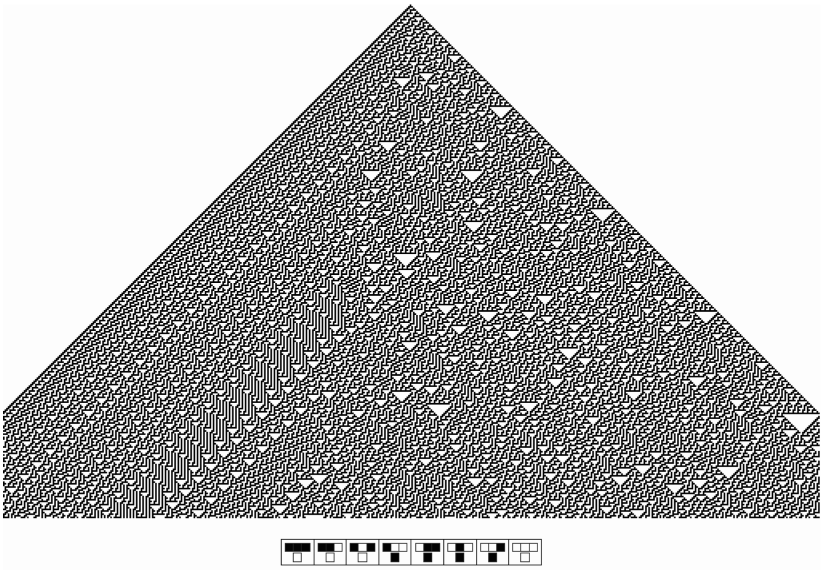


Už je to dost složité, ale vidíme, že je to velmi pravidelné: je to soběpodobný fraktální vzor - právě vytvořený z identických vnořených kusů. Člověk by si mohl myslet, že pokud má jednoduché pravidlo a začíná pouze z jedné černé buňky, pak by měl vždy získat vzor, který je nějak velmi pravidelný. Alespoň tehdy jsem předpokládal, že je to pravda. Ale jednoho dne jsem se rozhodl vyzkoušet velmi systematický experiment a spustit každé z 256 možných nejjednodušších pravidel buněčného automatu.

Když jsem dostal pravidlo číslo 30, viděl jsem tohle.



Co se tady děje? Nechme to proběhnout o trochu déle.

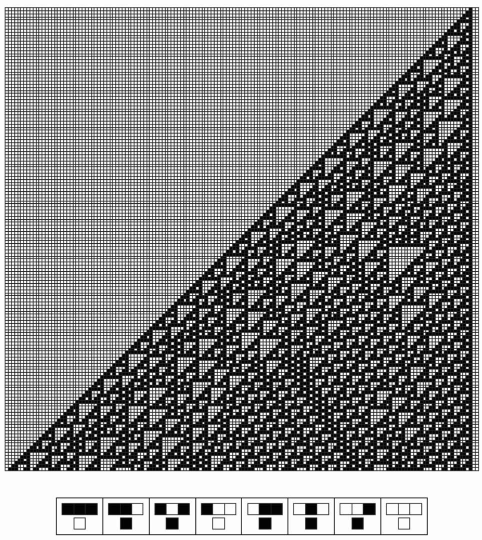


Na levé straně je trochu pravidelnosti. Ale jinak to vypadá opravdu komplikovaně - vlastně trochu náhodně. Když jsem to poprvé viděl, myslel jsem, že by to mohl být jen vizuální problém: že opravdu existují pravidelnosti, ale prostě jsme je neviděli. Takže jsem provedl všechny druhy matematických a statistických testů. A zjistil jsem, že ne, středový sloupec buněk byl opravdu naprosto náhodný.

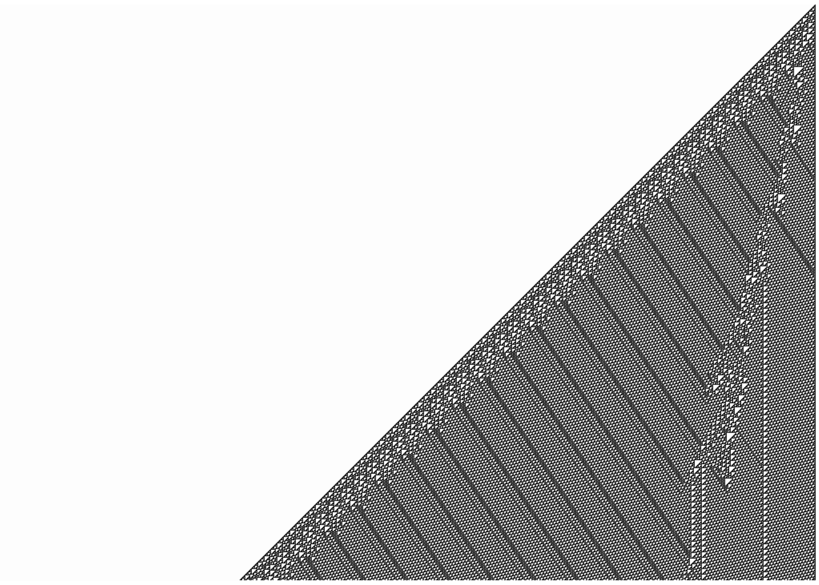
Ale to je úžasné zjištění. Máme velmi jednoduché pravidlo a začínáme z jedné černé buňky. Ale to, co dostáváme ven, je velmi komplikovaný vzorec, který se v mnoha ohledech zdá náhodný. Nezdá se to správně. Dali jsme do toho tak málo, ale dostáváme z toho tak moc. Není to to, co naše obyčejná intuice říká, že by se mělo stát. Chci říct, v našich každodenních zkušenostech například v inženýrství jsme zvyklí dělat to, že abychom vytvořili něco komplikovaného, musíme nějak začít složitými plány nebo použít složitá pravidla. Ale to, co zde vidíme, je, že i extrémně jednoduchá pravidla mohou způsobit neuvěřitelně komplikované chování.

Trvalo mi roky, než jsem se s tímto fenoménem smířil. A ve skutečnosti to postupně převrátilo téměř vše, co jsem si myslel, že vím o základech vědy.

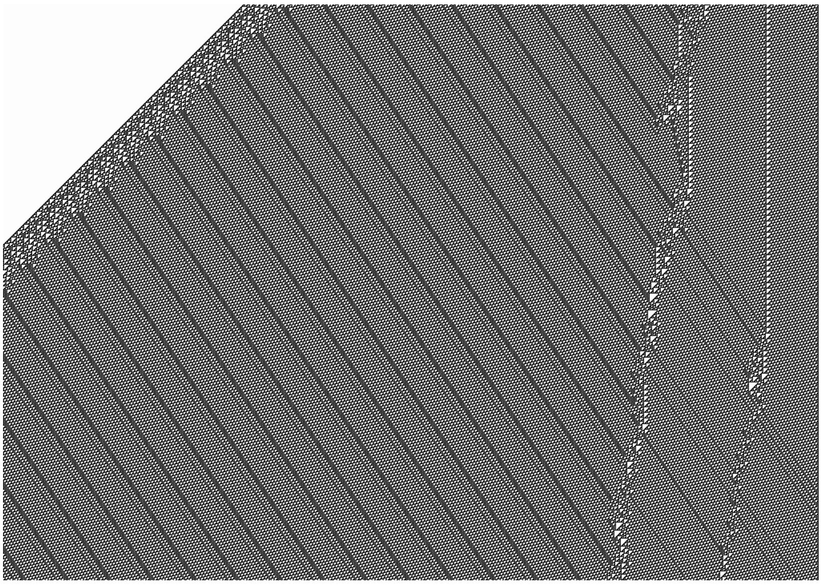
Když jsem viděl pravidlo 30, co víc se může stát? Zde je další z 256 nejjednodušších mobilních automatů; Toto je pravidlo 110.



Tenhle roste jen na levici. Ale co to dělá? Nechme to proběhnout o trochu déle.

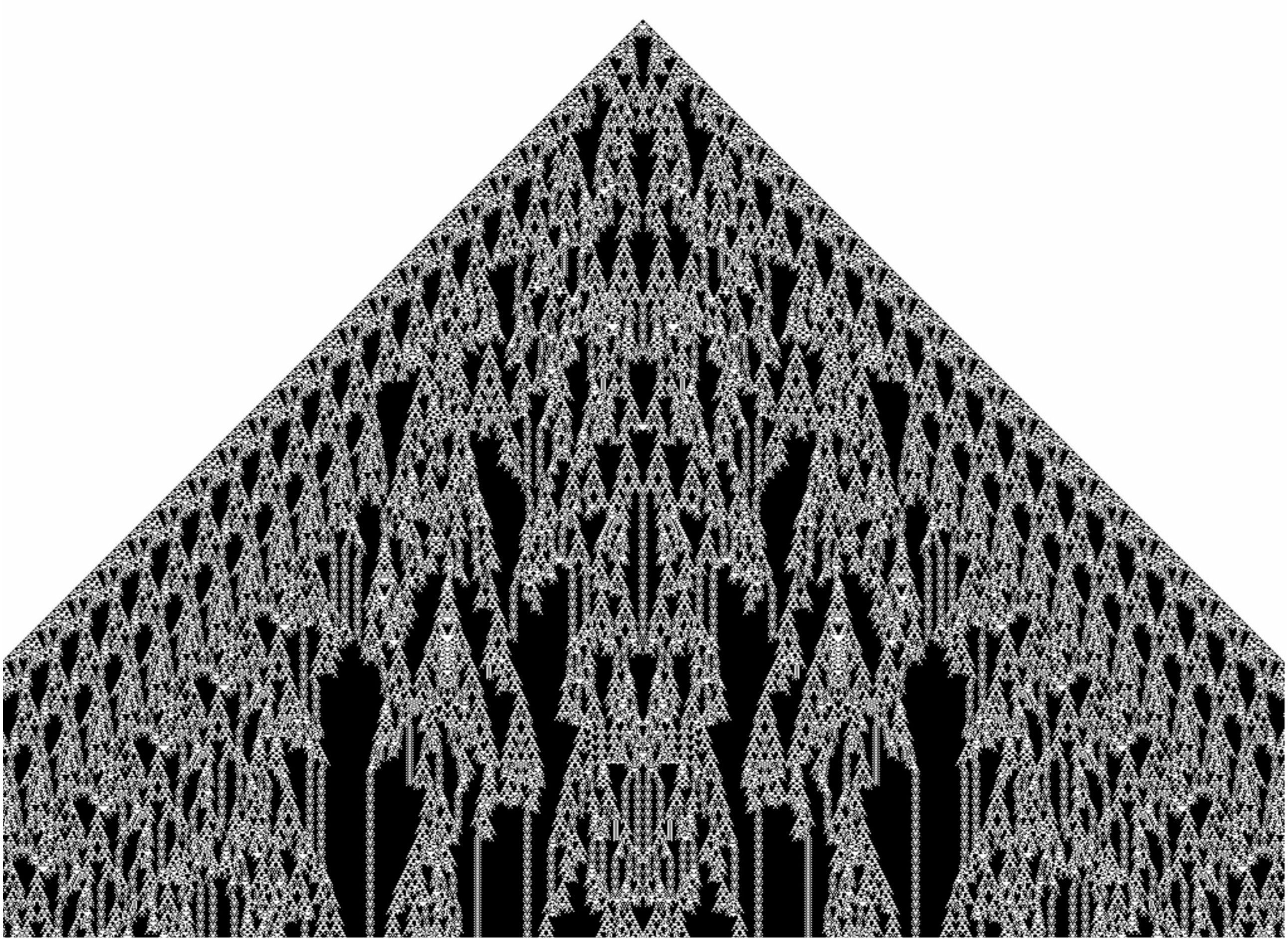


Nevytváří to žádnou jednotnou náhodnost. Místo toho vidíme, jak kolem pobíhají složité malé struktury. Ale co se tady stane? Jediný způsob, jak to zjistit, je pokračovat v provozu systému.

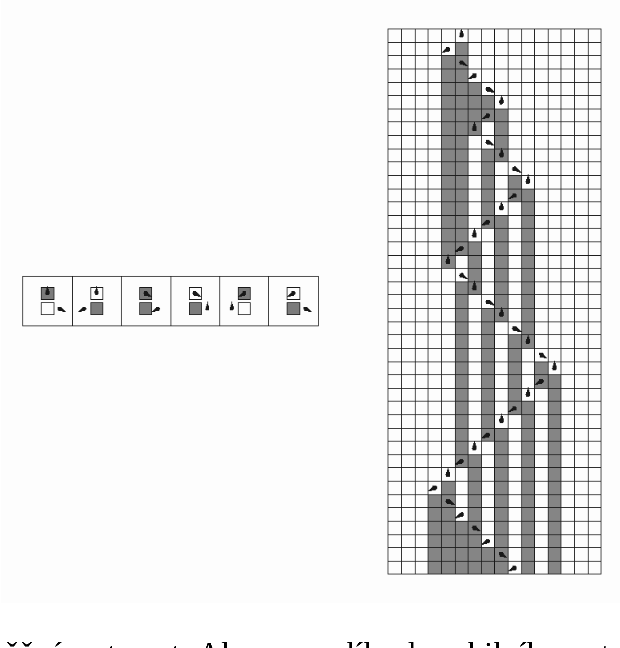


Dostaneme víc těch malých struktur, nebo všechny vymřou? Nebo co se stane? Po 2780 krocích konečně dostaneme odpověď: alespoň v tomto případě v podstatě skončíme jen s jednou strukturou. Ale je úžasné, že všechno, co dostaneme, začíná z jedné malé černé buňky a pravidla pro její šíření.

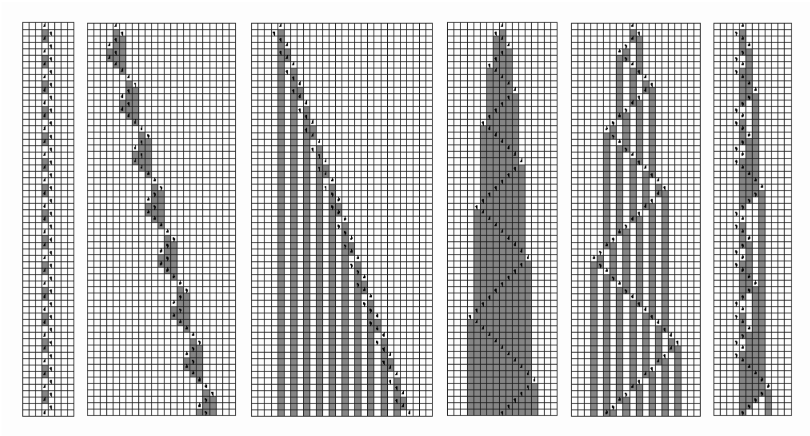
V polovině osmdesátých let jsem studoval spoustu buněčných automatů a viděl jsem tyto základní jevy. Ale nebyl jsem si jistý, jestli jsou nějak specifické pro mobilní automaty, nebo obecnější. A měl jsem praktický problém, že neexistuje snadný způsob, jak nastavit všechny velmi odlišné typy počítačových experimentů, které bych musel udělat, abych to zjistil. Teprve až v devadesátých letech jsem znovu – s ohledem na nové technologické vybavení - začal zkoumat tyto vědecké otázky. A bylo to opravdu neuvěřitelné. Věci, které mi předtím trvaly několik dní – trvaly minuty – a bylo snadné dělat všechny experimenty, které jsem chtěl. Myslím, že to byl pocit, jako když byly poprvé vynalezeny dalekohledy nebo mikroskopy. Mohli bychom je někam namířit a téměř okamžitě vidět celý svět nových jevů – jako jsou jupiterské měsíce nebo mikroskopická stvoření v kapce vody z rybníka. Ale v tomto případě ve výpočetním světě. První otázka tedy zněla: jak zvláštní jsou mobilní automaty? Díval jsem se na spoustu mobilních automatů a často jsem viděl velmi komplikované chování.



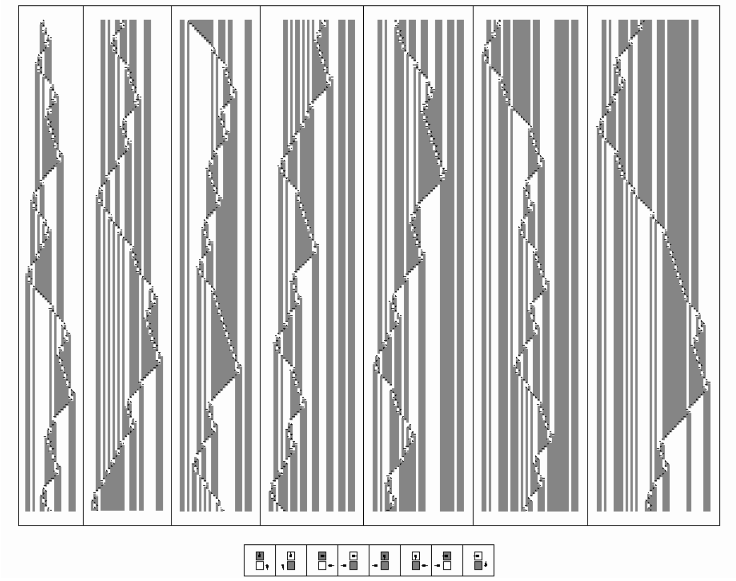
Ale co programy s různými nastaveními? Tady je například Turingův stroj.



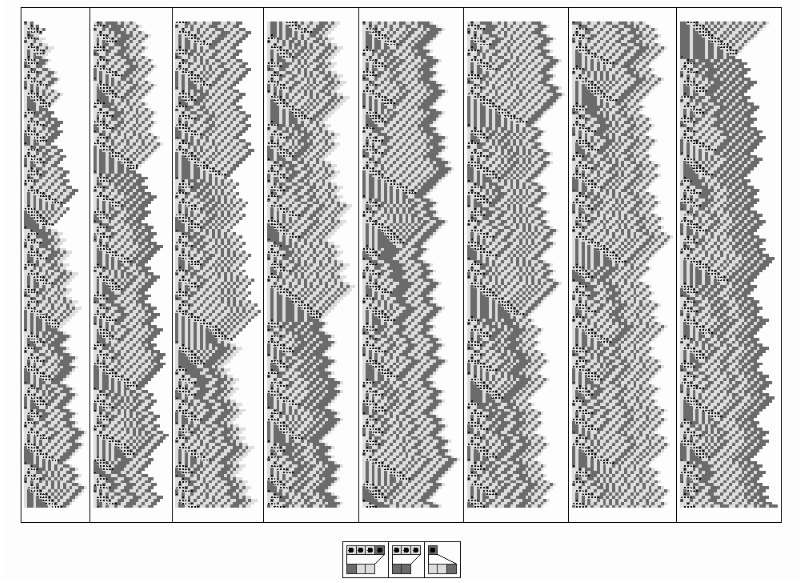
Má řadu buněk, jako buněčný automat. Ale na rozdíl od mobilního automatu se v každém kroku aktualizuje pouze jedna buňka, která se pohybuje. Prvních pár Strojů Turing dělá jen tohle.



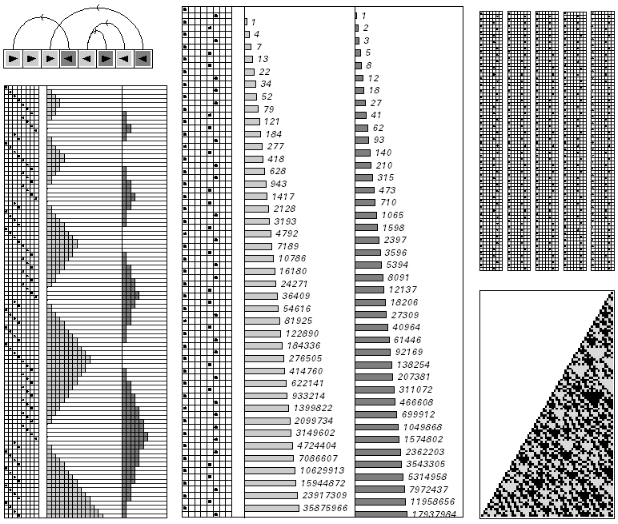
Ale pokud člověk pokračuje – stále s velmi jednoduchými pravidly – pak najednou vidí toto.



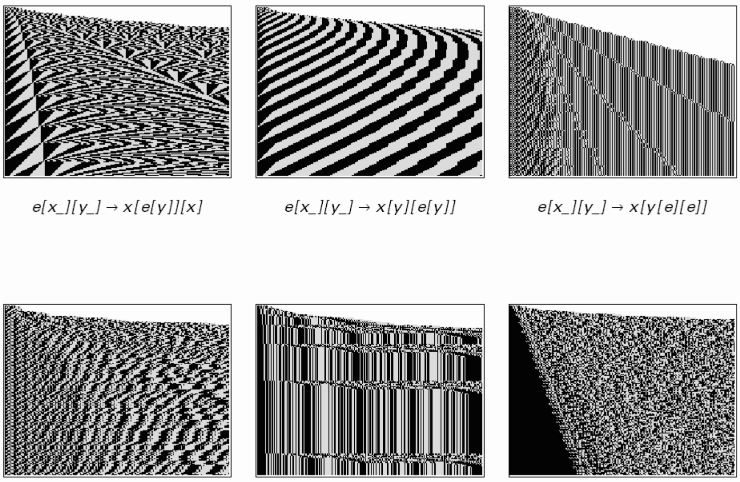
Stejný druh složitosti, jaký jsme viděli v mobilních automatech. A co jiné druhy programů? Díval jsem se na mnoho, mnoho různých druhů. Sekvenční substituční systémy, které přepisují řetězce jako iterovaný textový editor.



Registrové stroje – něco jako minimální idealizace strojového jazyka.



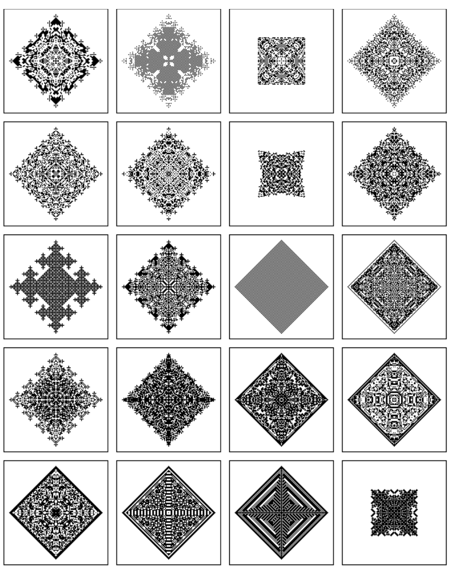
Také symbolické systémy – jako zobecnění kombinátorů nebo druh minimálních idealizací *matematiky*.



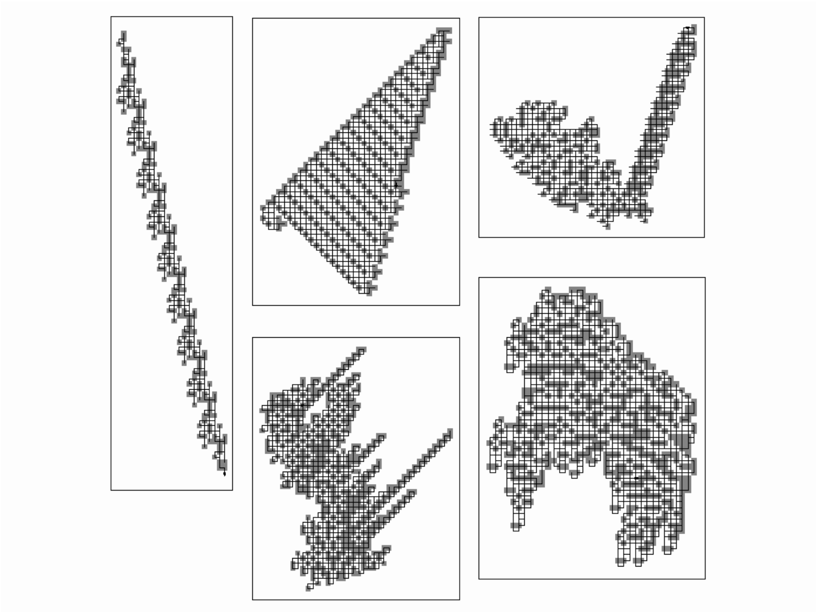
e[x_][y_] → x[e[y]][x]   e[x_][y_] → x[y][e[y]]   e[x_][y_] → x[y[e][e]]

e[x_][y_] → x[y[x]]   e[x_][y_] → e[x[e][y[e]]]   e[x_][y_] → e[y[e[e][e]][x]]

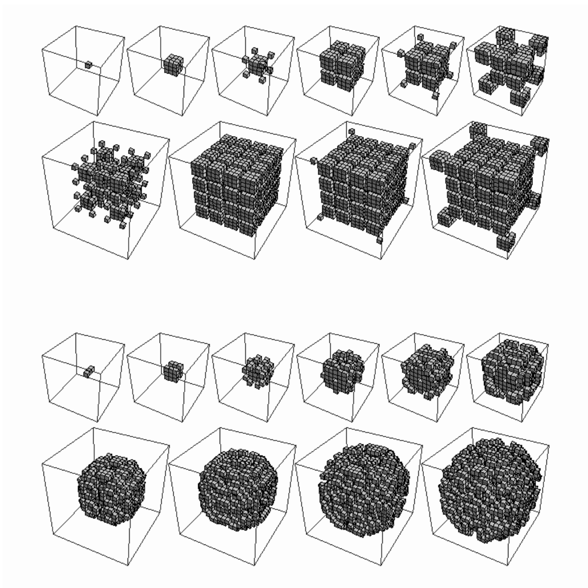
Je to stejný příběh ve dvou dimenzích.
V mobilních automatech.



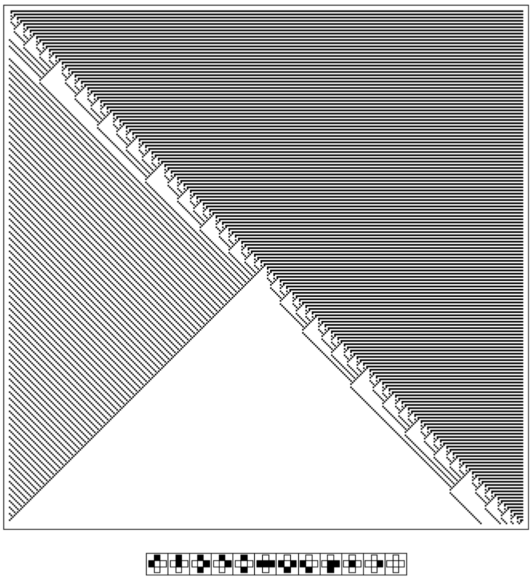
V Turingových strojích.



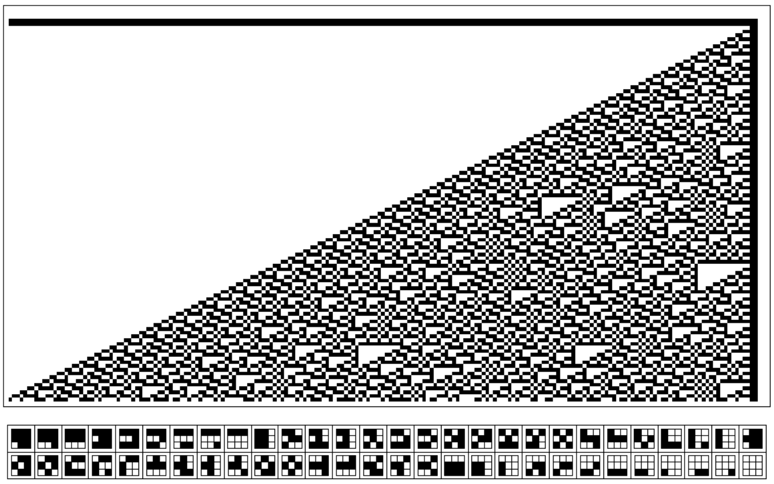
Nebo ve třech dimenzích.



Pokaždé člověk vidí totéž: i s velmi jednoduchými pravidly může být extrémně komplikované chování. Člověk ani nepotřebuje pravidla, která určují explicitní proces evoluce: omezení fungují také. Např. zde je nejjednodušší sada omezení dlaždic, která vynucují neperiodický vzor.



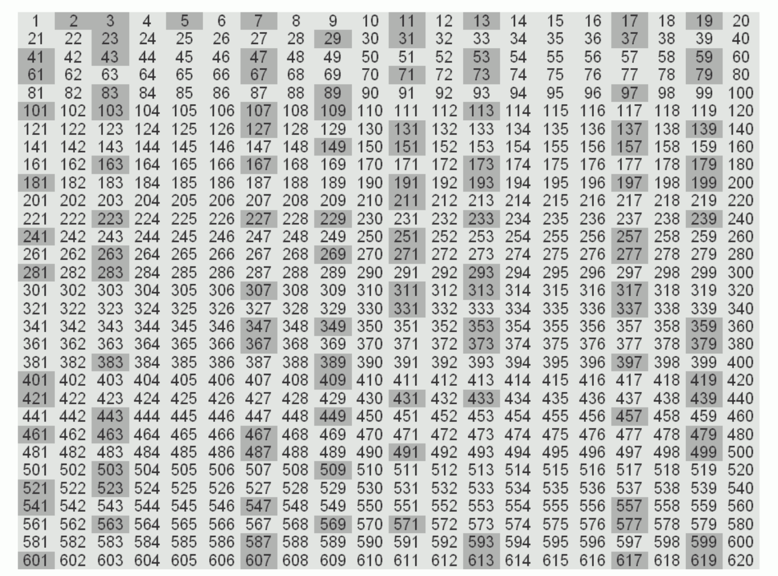
A zde jsou omezení, která dávají jakýsi "krystal", který je nucen mít vzor pravidla 30.



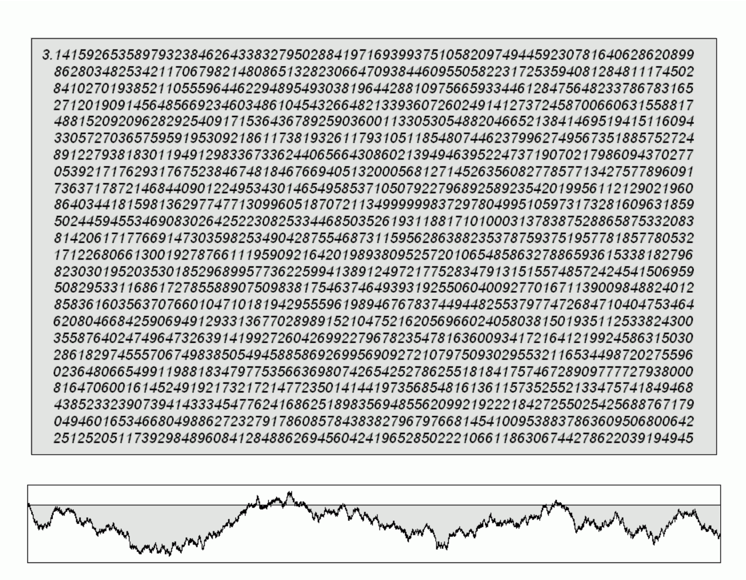
Kamkoli se člověk podívá, je to vždy stejná základní věc: neuvěřitelně jednoduchá pravidla mohou poskytnout neuvěřitelně komplikované chování. Zdá se, že se jedná o velmi robustní a velmi obecný jev.

Ale jak to, že něco tak zásadního nebylo známo celé věky? No, částečně je to proto, že to lze snadno vidět pouze tím, že děláte spoustu počítačových experimentů, které lze provést pouze s počítači. Ale důležitější je, že s naší běžnou intuicí se prostě nezdálo, že by byl důvod takto experimentovat. Zdálo se zřejmé, že neukážou nic zajímavého. Teď, když jsme zjistili, že jednoduché programy - jednoduchá pravidla - mohou produkovat komplikované chování, můžeme se vrátit a najít o tom všechny druhy náznaků z minulosti.

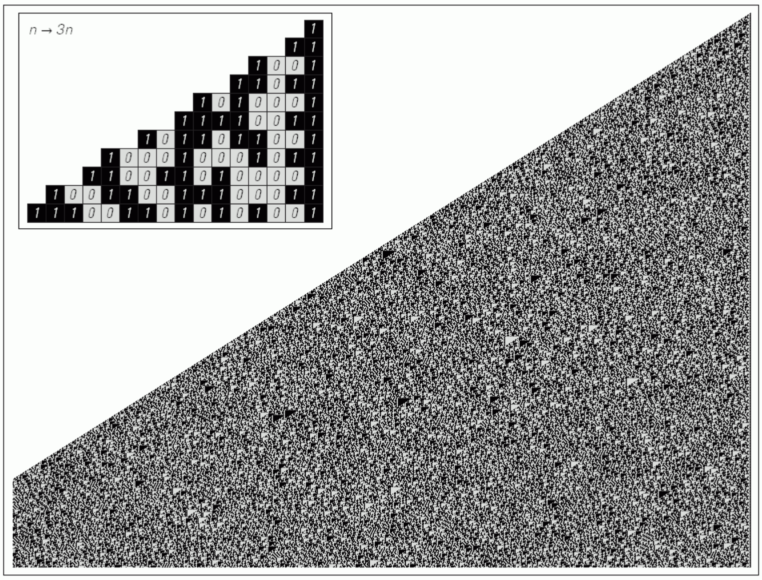
Před téměř 2500 lety hledali Řekové příklady v prvočíslech. A existuje poměrně jednoduché pravidlo – poměrně jednoduchý program – pro generování všech prvočísel. Ale sekvence prvočísel, jakmile je generována, vypadá pozoruhodně nepravidelně i komplikovaně.



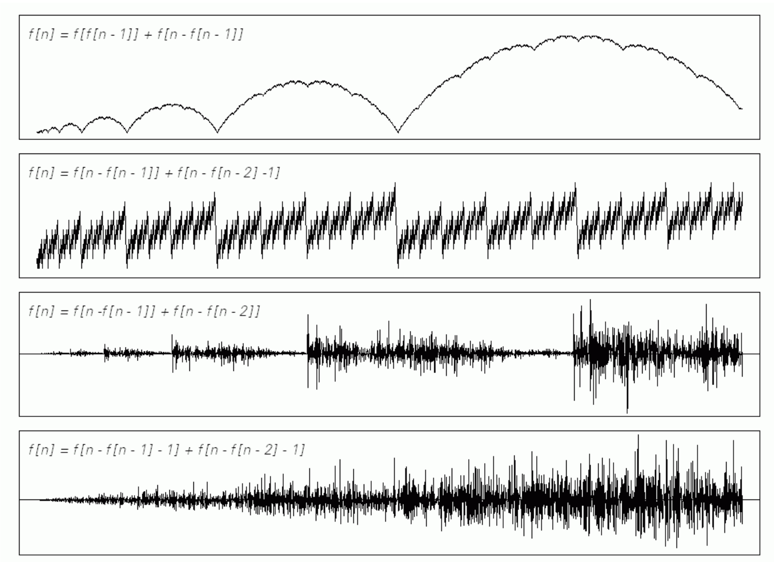
Existuje také poměrně jednoduché pravidlo pro generování číslic pí. Ale jakmile je tato sekvence generována, připadá nám zcela náhodná.



Ve skutečnosti je spousta případů takových věcí s čísly. Např.



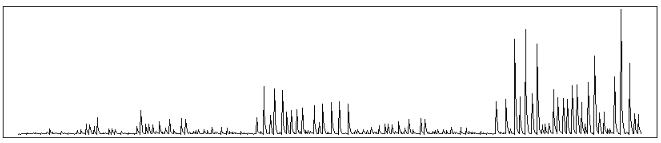
Taková minimální verze lineárního generátoru náhodných čísel. A už tak úžasně komplikované. Můžete také vytvořit velmi složité sekvence z jednoduchých opakování.

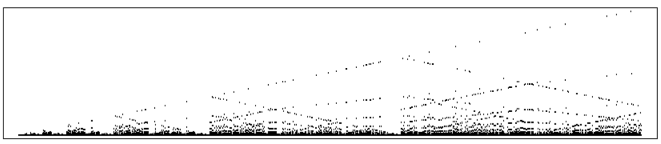


A zde je například nejjednodušší rekurzivní funkce, která má složité chování.

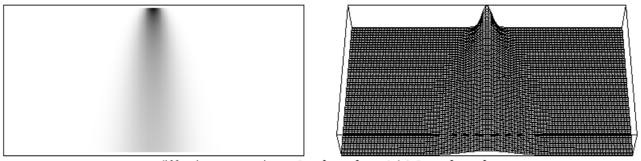
```
z = 0 &                                                        (zero)
s = # + 1 &                                                    (successor)
p[i_] := Slot[i] &                                             (projection)
r[g_, h_] = If[#1 == 0, g[##2], h[#0[#1 - 1, ##2], #1 - 1, ##2]] &   (primitive recursion)
```

```
r[z, r[s, r[s, r[s, p[2]]]]]
```

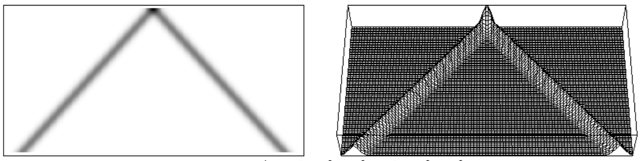




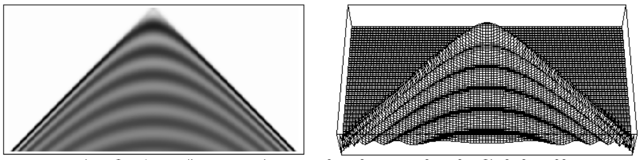
A co jiné systémy založené na číslech? Co například ty oblíbené věci z tradiční matematické vědy: parciální diferenciální rovnice? Pracuje jejich nepřetržitý charakter jinak? Ty, které lidé obvykle studují, vykazují poměrně jasné chování.



diffusion equation: $\partial_t u[t, x] = 1/4\, \partial_{xx} u[t, x]$

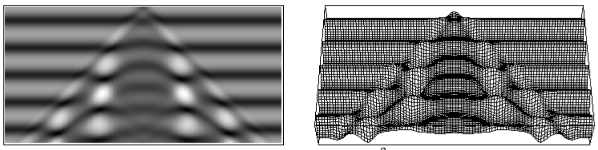


wave equation: $\partial_{tt} u[t, x] = \partial_{xx} u[t, x]$

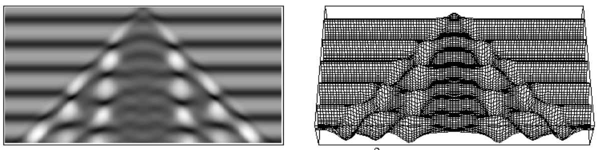


sine-Gordon soliton equation: $\partial_{tt} u[t, x] = \partial_{xx} u[t, x] + Sin[u[t, x]]$

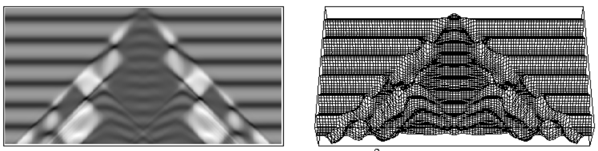
Ale v prostoru všech možných symbolických rovnic jsem našel i tohle.



$\partial_{tt} u[t, x] = \partial_{xx} u[t, x] + (1 - u[t, x]^2)(1 + u[t, x])$



$\partial_{tt} u[t, x] = \partial_{xx} u[t, x] + (1 - u[t, x]^2)(1 + 2\, u[t, x])$

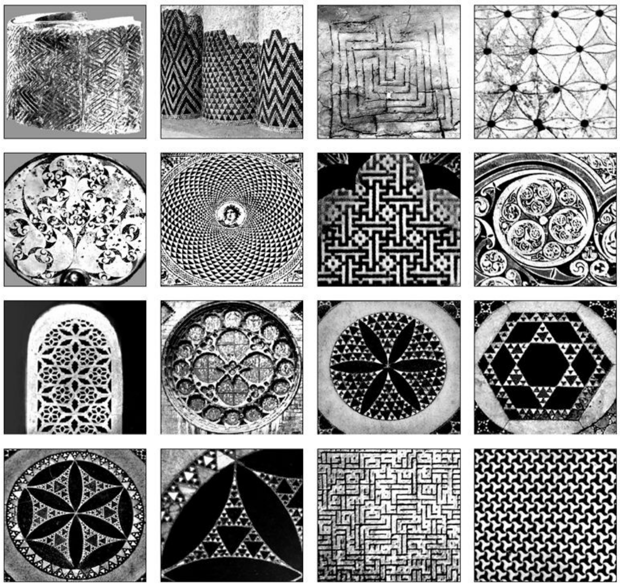


$\partial_{tt} u[t, x] = \partial_{xx} u[t, x] + (1 - u[t, x]^2)(1 + 4\, u[t, x])$

Jsou to jen jednoduché nelineární parciální diferenciální rovnice. Ale i s velmi jednoduchými počátečními podmínkami nakonec dělají spoustu složitých věcí.

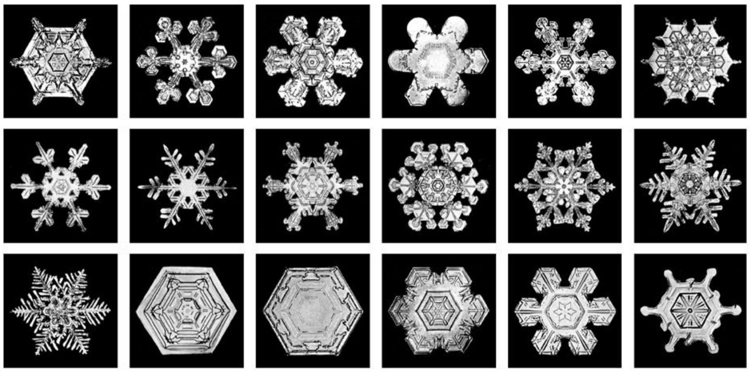
Vlastně je trochu těžké přesně říct, co dělají. Jedná se o skvělé testy našich schopností najít jejich řešení. Ale s kontinuálním systémem, jako je tento, je vždy problém. Protože nakonec je těžké říct, jestli to, co vidíte, je něco skutečného. A to je důvod, proč mezi matematiky mohou mít numerické experimenty někdy špatné jméno. Ale v diskrétním systému, jako je pravidlo 30, člověk vidí skutečný jev.

Někdy si říkám, zda – trochu jako je tato – by jednoho dne mohla být objevena prastará mozaika pravidla 30. Ale spíše si myslím, že kdyby pravidlo 30 bylo ve starověku skutečně známé, mnoho myšlenek o vědě a přírodě by se vyvíjelo poněkud jinak. Protože jak to tak je, vždy se mi zdálo jako velká záhada, jak by příroda mohla – zřejmě tak bez námahy – vyrobit tolik, co se nám zdá tak složité. Jako by příroda má nějaké zvláštní tajemství, které jí umožňuje dělat věci, které jsou mnohem složitější než to,co lidé normálně vyrábí.

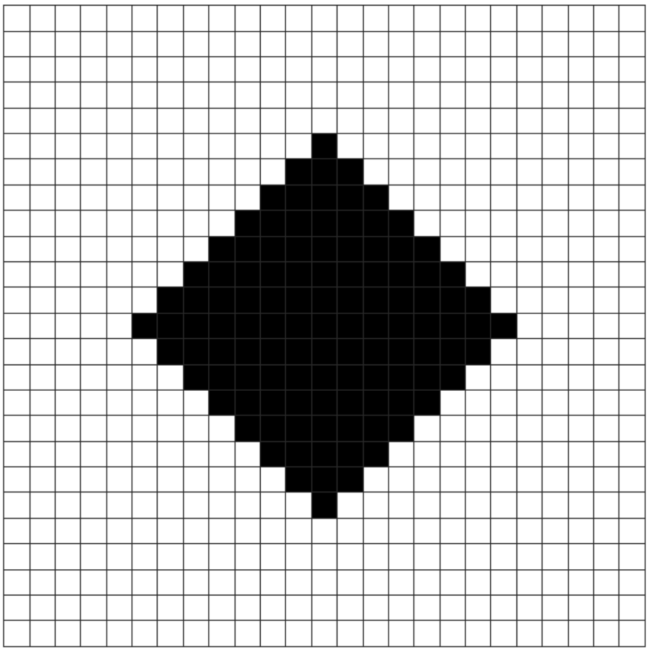


To naznačuje, že vše, co je potřeba, je, aby věci v přírodě dodržovaly pravidla typických jednoduchých programů. A pak je téměř nevyhnutelné, že – stejně jako v případě pravidla 30 – může být jejich chování velmi složité. Způsob, jakým jsme my jako lidé zvyklí produkovat věci, které máme tendenci provozovat pod tlakem toho, k čemu jsou určeny. A to znamená, že jsme nakonec nuceni používat pouze velmi speciální sadu programů s jednoduchým a předvídatelným chováním. Jde však o to, že příroda není pod takovým tlakem a tím nevyhnutelně vytváří všechny druhy složitosti.

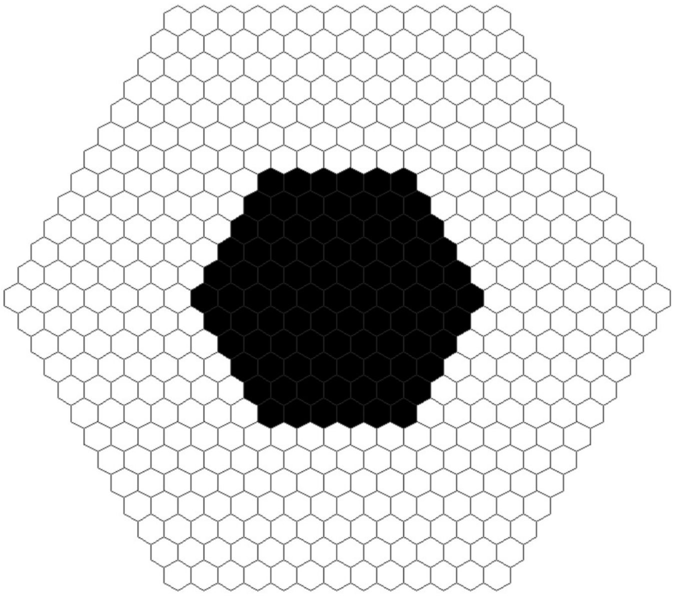
Jakmile člověk začne přemýšlet o jednoduchých programech, je vlastně úžasné, jak snadno lze začít chápat základní rysy toho, co se děje ve všech nejrůznějších systémech v přírodě. Jako jednoduchý příklad lze uvést např. sněhové vločky.



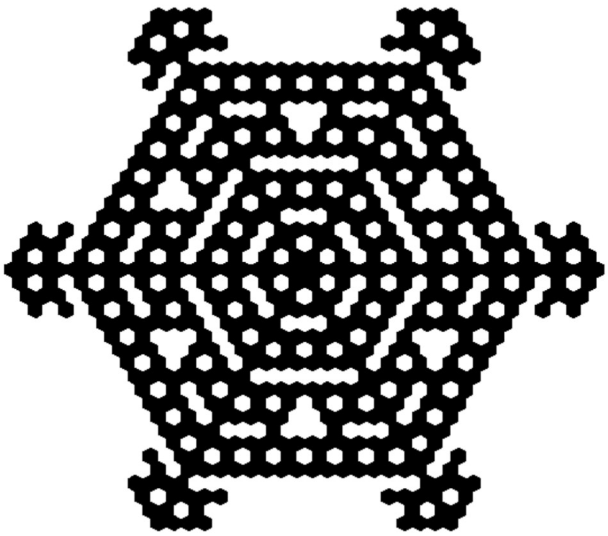
Krystaly rostou tím, že začínají od semene a pak postupně přidávají kusy pevné látky. A člověk se to může pokusit zachytit jednoduchým dvourozměrným buněčným automatem. Představte si mřížku, kde každá buňka je buď obsazena, nebo ne. Pak začněte od semínka a máte pravidlo, které říká, že těleso bude přidáno do každé buňky, která sousedí s buňkou, která je již obsazena.



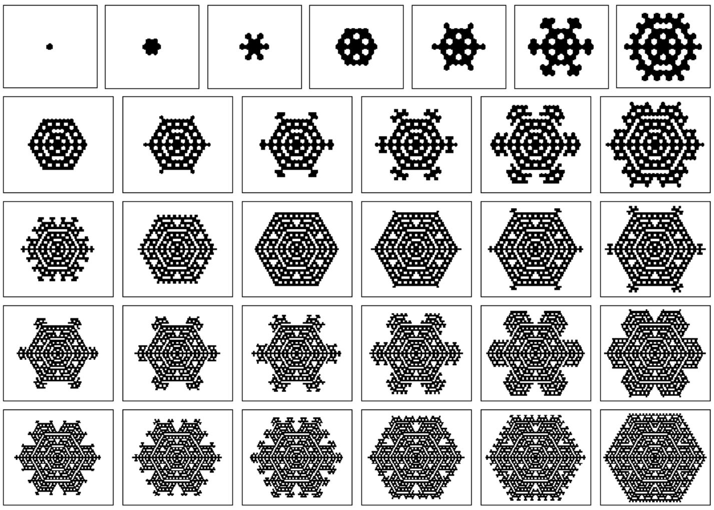
Je to obyčejně vypadající lícovaný krystal, tady na čtvercové mřížce. Totéž lze udělat na šestiúhelníkové mřížce.



Ale u sněhových vločky zde chybí důležitý efekt. Když kus ledu tuhne, uvolní se nějaké latentní teplo. A to brání tomu, aby se poblíž tvořilo více ledu. Jaký je nejjednodušší způsob, jak zachytit tento efekt? Stačí změnit mobilní automat a říct, že led se přidá pouze v případě, že je tu přesně jedna sousední buňka ledu.



Tohle jsou všechny fáze.

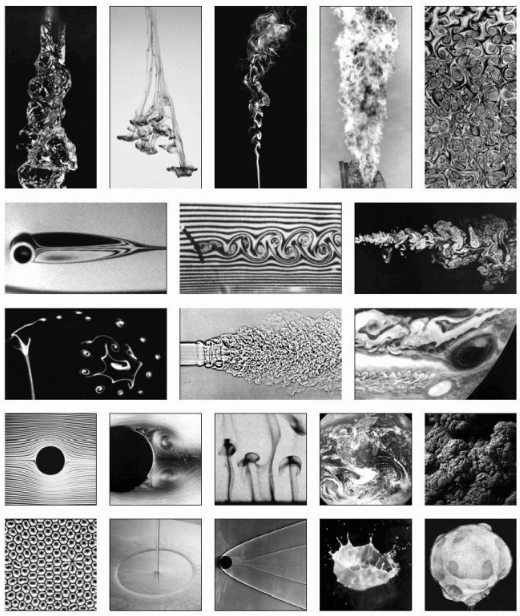


Vypadá to, že jsme zachytili základní mechanismus, díky kterému mají tvary sněhové vločky. A máme různé předpovědi: jako že velké sněhové vločky budou mít malé díry. Což vskutku dělají. Jsou tu samozřejmě detaily, které jsou jiné. Ale musíme pochopit, že to se musí stát s jakýmkoliv modelem. Protože smyslem modelu je zachytit určité základní rysy systému – a pak idealizovat vše ostatní. A v závislosti na tom, co ho zajímá, si člověk může vybrat různé funkce, které se mají zachytit.

A tak je model mobilního automatu dobrý, například pokud se člověk zajímá o základní otázku, proč mají sněhové vločky složité tvary nebo jaké bude rozložení tvarů nějaké sněhové vločky. Ale není to tak užitečné, pokud se člověk snaží zjistit, jak rychle bude každá růst při určité teplotě.

Mohl bych říci, že ve skutečnosti existuje obecný zmatek ohledně modelování, který se často zdá, když lidé slyší o mobilních automatech. Buňky a pravidla abstraktně představují určité rysy systému. A opět, jaká abstraktní reprezentace – jaký typ modelu – je nejlepší, závisí na tom, co člověka zajímá. Pro sněhové vločky existují jistě tradiční diferenciální rovnice, které by mohly být použity, ale jsou komplikované a těžko řešitelné. Pokud nás zajímá základní otázka, proč mají sněhové vločky složité tvary, v tom případě je model mobilního automatu mnohem lepší způsob řešení.

Vezměme si další příklad. Promluvme si o turbulencích.

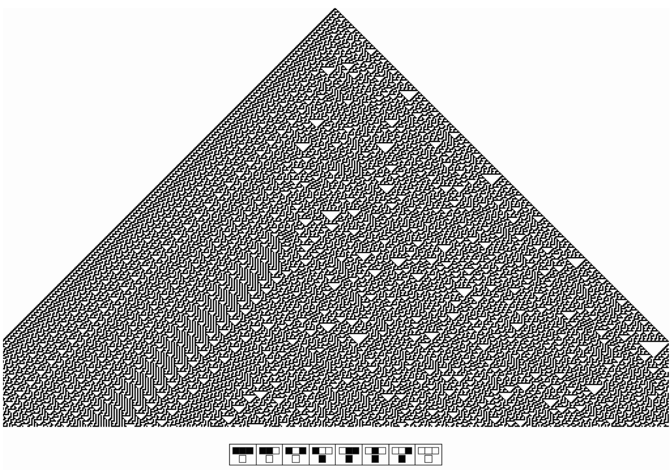


Kdykoliv je v rychle se pohybující tekutině překážka, vzorec toku kolem něj vypadá komplikovaně a zcela náhodně. Ale odkud se ta náhodnost bere? Člověk se může ptát na stejnou otázku o náhodnosti v jakémkoli systému. A myslím, že existují tři základní způsoby, jak může náhodnost nastat .

Náhodnost může pocházet z vnějšku – z prostředí. Jako když se loď pohupuje na oceánu. Samotná loď nevytváří náhodnost, ale pohybuje se náhodně, protože je vystavena náhodnosti vln oceánu. Je to stejný druh jako Brownův pohyb, nebo elektronický šum.

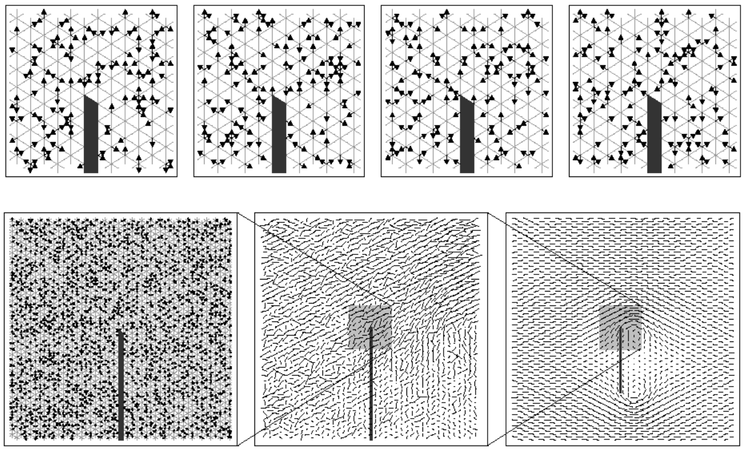
Další způsob, jak získat náhodnost, je to, čemu se obvykle říká teorie chaosu. A klíčovou myšlenkou je, že náhodnost pochází z podrobností počátečních podmínek. Přemýšlejte o házení mincí nebo otáčení kola. Jakmile to začne, není žádná náhodnost v tom, jak se pohybuje. Ale to, kterým směrem bude nasměrovat, až zastaví, závisí citlivě na počáteční rychlosti. A pokud to bylo zahájeno ručně, vždy v tom bude trochu náhodnost - takže výsledek se bude zdát náhodný.

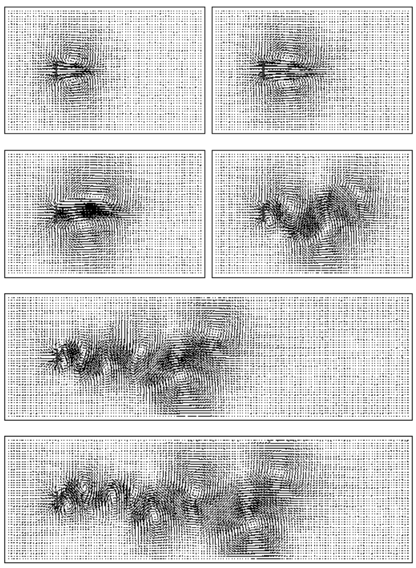
Ale existuje ještě jiná možnost. Podívejte se na pravidlo 30.



Tady zpočátku není žádná náhodnost. Na počátku je pouze jedna černá buňka. A není žádný vstup zvenčí. Ale stane se to, že vývoj systému jen vnitřně vytváří zjevnou náhodnost.

Dobře, a co turbulence tekutin? Odkud se ta náhodnost vyvíjí? S tradičními způsobem modelování chování tekutin diferenciálními rovnicemi je velmi obtížné to zjistit. Ale lze vytvořit jednoduchý model mobilního automatu. Pamatujte, že na nejnižší úrovni se tekutina skládá z molekul. A vlastně víme, že detaily nejsou příliš důležité. Protože vzduch a voda a všechny druhy dalších tekutin, které mají zcela odlišné mikroskopické struktury, stále vykazují stejné chování kontinuální tekutiny. S tímto vědomím se můžeme pokusit vytvořit minimální model. Molekuly jsou na diskrétní mřížce, s diskrétní rychlostí.





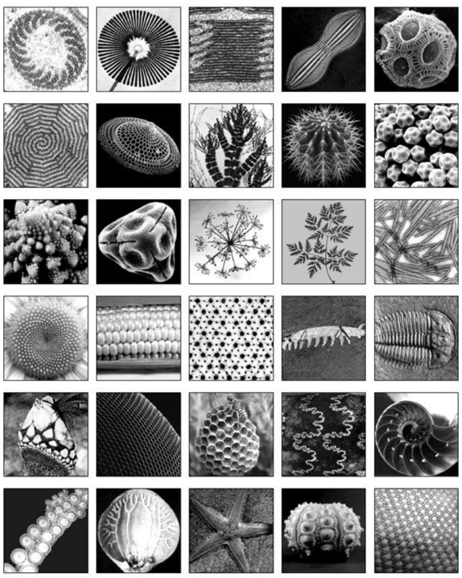
Když se to tak udělá, lze modelovat dynamiku tekutin i řešit některé základní otázky s tím spojené. A zdá se, že není potřeba náhodnost z prostředí nebo náhodnost z počátečních podmínek. Lze získat náhodnost z vnitřní generování náhodnosti – z něčeho jako již zmiňované pravidlo 30.

Pokud se někdo snaží vytvořit modely turbulencí, je důležité vědět, odkud pochází náhodnost v nich. A vnitřní generování náhodnosti dává alespoň jednu okamžitou předpověď: říká, že v dostatečně pečlivě kontrolovaném experimentu by turbulence měly být přesně opakovatelné. Víte, pokud náhodnost pochází z prostředí nebo z detailů počátečních podmínek, bude to nevyhnutelně jiné v různých běhech experimentu. Ale pokud je to jako pravidlo 30, pak to bude vždy stejné pokaždé, když někdo spustí experiment.

Člověk se může ptát na náhodnost ve všech systémech. Například ve finančnictví. Tam, kde je nejviditelnějším rysem téměř každého trhu, je to, že ceny kolísá zcela náhodně. Ale odkud se ta náhodnost bere? Něco z toho je určitě z prostředí. Ale něco je pravděpodobně ze své podstaty generováno. A vědět to je velmi důležité, pokud chcete například předvídat chování na burzách.

Ve fyzice se hodně diskutovalo o náhodnosti. Druhý zákon termodynamiky - entropie se zvyšuje. Hodně se o tom ví, ale stále existuje základní záhada o tom, jak zákony fyziky mohou být reverzibilní, ale v naší každodenní zkušenosti vidíme tolik zjevné nevratnosti. A myslím, že vnitřní generace náhodnosti konečně dává jeden způsob, jak to vysvětlit. Je to trochu dlouhý příběh, ale v podstatě je to tak, že věci jako pravidlo 30 mohou tak šifrovat data spojená s počátečními podmínkami, že žádné realistické experimenty nebo pozorování je nemohou dekódovat, aby zjistily, jak se vrátit zpět.

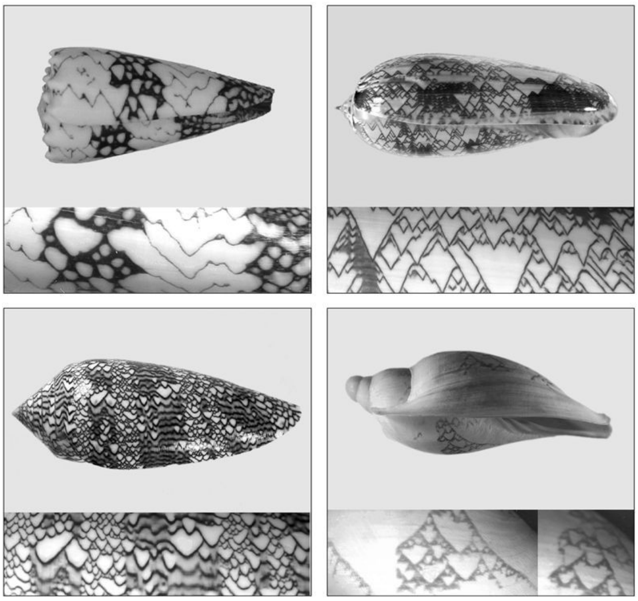
V biologii je určitě hodně složitosti. A lidé často předpokládají, že je to vyšší úroveň než ve fyzice. A obvykle si myslí, že je to nějak kvůli adaptaci a přirozenému výběru. Ale ve skutečnosti nikdy nebylo jasné, proč by přirozený výběr měl vést k velké složitosti vůbec. A to je pravděpodobně důvod, proč si alespoň mimo vědu mnoho lidí myslelo, že se musí dít něco jiného. Ale otázka zní: co to je? No, myslím, že ve skutečnosti je to jen abstraktní fakt, že jsme zjistili s pravidlem 30 a podobně, že s jednoduchými programy je ve skutečnosti velmi snadné získat složitost. Samozřejmě, kompletní genetický program pro typický organismus je docela dlouhý a komplikovaný. Ale je stále jasnější, že mnoho z nejzřejmějších aspektů forem a vzorců v biologii se ve skutečnosti řídí poměrně malými programy. A když se podíváme na některé druhy pravidelností, které člověk vidí v biologických systémech, nezdá se to příliš překvapivé. Ale když člověk vidí složitější věci, tradiční intuice má tendenci naznačovat, že toho muselo být obtížné dosáhnout a s přirozeným výběrem se rovněž nabízí myšlenka, že to musí být výsledek dlouhého a obtížného procesu optimalizace.



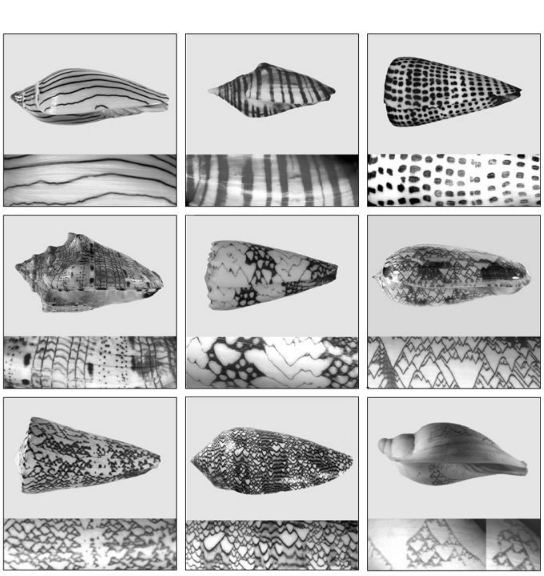
Vlastně si myslím, že biologie není místo, odkud pochází mnoho z nejzřetelnějších příkladů složitosti.

Přirozený výběr se zdá být docela dobrý v práci na malém počtu hladkých parametrů - prodloužení jedné kosti a zkrácení druhé a tak dále. Ale když je v tom větší složitost, je velmi těžké, aby to vůbec nějak fungovalo. Nísto toho si myslím, že to, co člověk nakonec vidí, je mnohem více jen výsledek typických náhodně vybraných genetických programů.

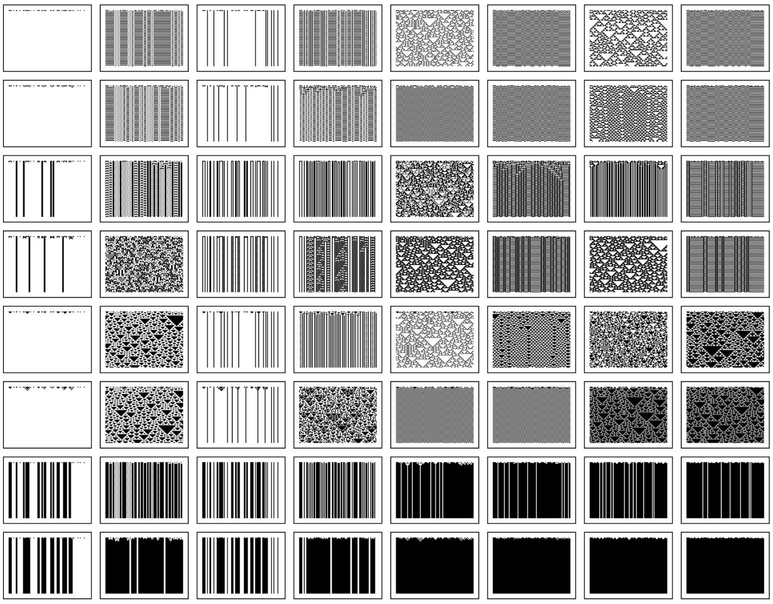
Zde je příklad. Některé skořápky měkkýšů s docela komplikovanými pigmentačními vzory.



V minulosti se mohlo předpokládat, že dostat věci tak komplikované musí být výsledek sofistikovaného procesu biologické optimalizace. Ale když se podíváte na tyto vzory, vypadají neuvěřitelně podobně jako vzory, které dostaneme z mobilních automatů, jako je pravidlo 30. Ve skutečné skořápce je vzor stanoven řadou buněk produkujících pigment na rostoucím okraji skořápky. A zdá se, že to, co se stane, může být zachyceno poměrně dobře pravidlem mobilního automatu. Tak proč jedno pravidlo a ne druhé? Když se člověk podívá na různé druhy, vidí různé vzorce.



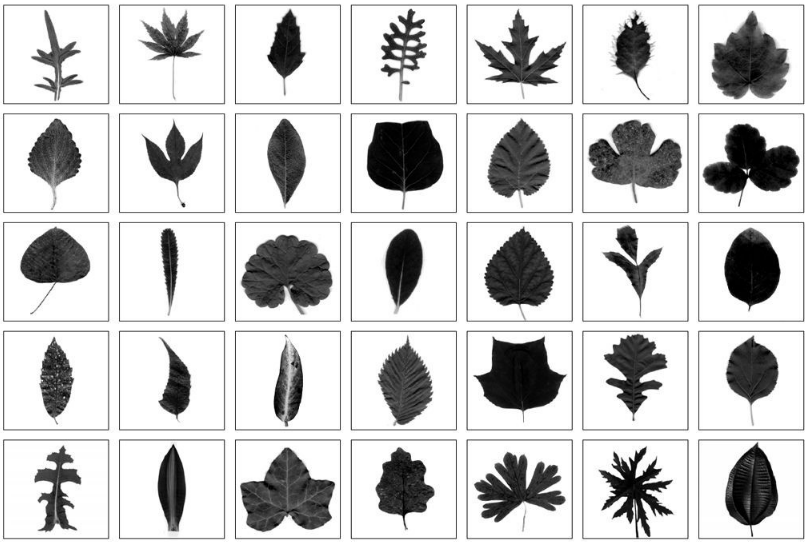
Jsou zde určité třídy. A překvapivě velmi dobře korespondují s třídami chování v mobilních automatech.



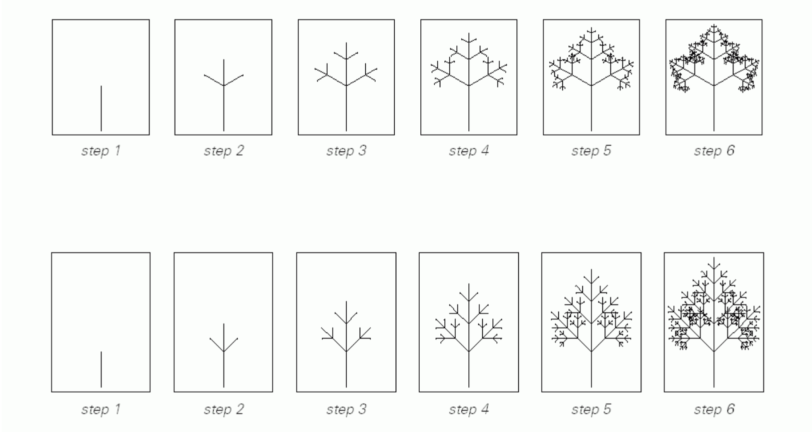
Vypadá to vskutku, jako by měkkýši světa jen vzorkovali prostor možných jednoduchých programů a pak zobrazovali výsledky na svých skořápkách.

Se vší důrazem na přirozený výběr si člověk tak nějak zvykl na myšlenku, že v biologii prostě nemůže být mnoho základní teorie a že věci, které člověk vidí v současných organismech, musí jen odrážet podrobné nehody v historii biologické evoluce. Ale příklad tyto skořápky naznačuje, že věci mohou být jiné a že místo toho by mohlo být rozumné myslet na různé typy organismů jako na jaksi rovnoměrné vzorkování celého prostoru možných programů.

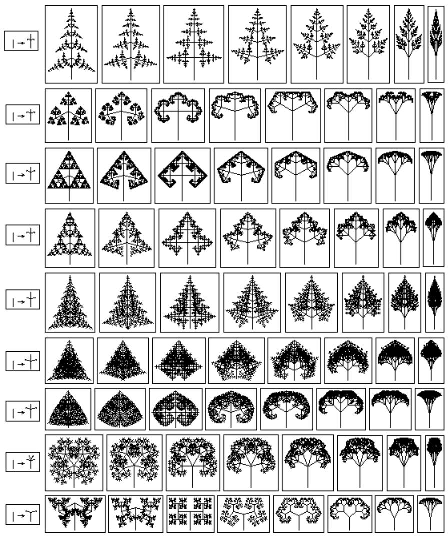
A ještě jeden příklad. Tvary listů.



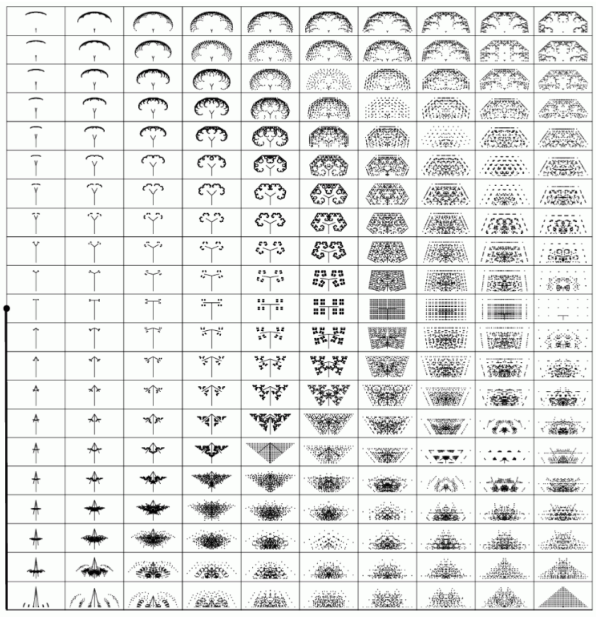
Člověk by si mohl myslet, že jsou příliš různorodé na to, aby to šlo vysvětlit jednotným způsobem. Ale ve skutečnosti se ukazuje, že existuje jednoduchý typ programu, který, jak se zdá, zachycuje téměř všechny z nich. Zahrnuje to jen postupné opakované větvení.



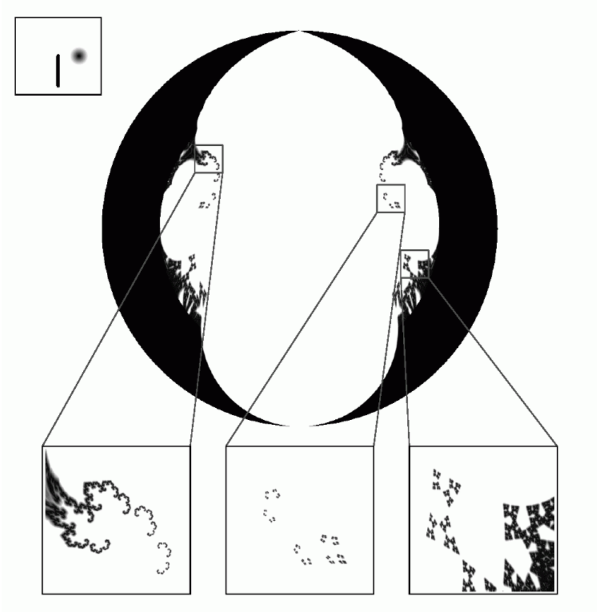
A pozoruhodné je, že omezující tvary, které člověk dostane, vypadají stejně jako skutečné listy, někdy hladké, někdy zubaté a tak dále.



Tady je jednoduchý případ, kdy lze rozložit všechny možné tvary, které člověk dostane.



A jedna věc, kterou lze vidět, je, že pouhou změnou parametru může zcela změnit, jaký typ listu člověk dostane a jak by mohl fungovat biologicky. Sofistikovaněji lze shrnout rysy možných listů v parametrické sadě prostoru, což se ukáže být docela jednodušší, lineární analog Mandelbrotovské sady.

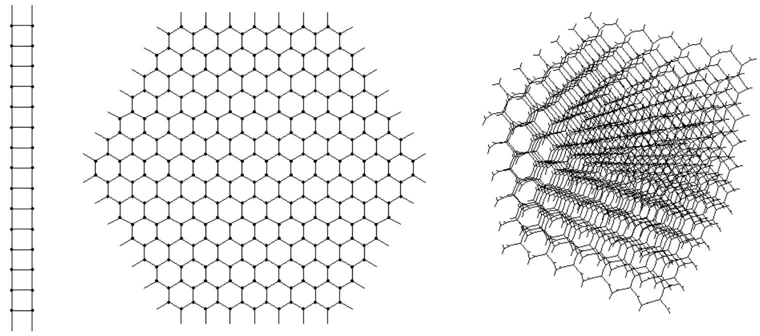


A z vlastností této sady lze odchýlit všechny druhy rysů listů a jejich pravděpodobný vývoj. Je toho hodně, co se říká o tom, jak lze použít nápady na jednoduché programy k zachycení toho, co se děje v biologii, a to jak na makroskopické úrovni toho druhu, o kterém jsem mluvil, tak na molekulární úrovni. Když se podíváme na historii biologie, je tu zajímavá analogie. Už v minulosti byly známy všechny údaje o genetice a zdálo se to opravdu komplikované. Ale pak přišla myšlenka digitálních informací v DNA a najednou bylo vidět celý mechanismus.

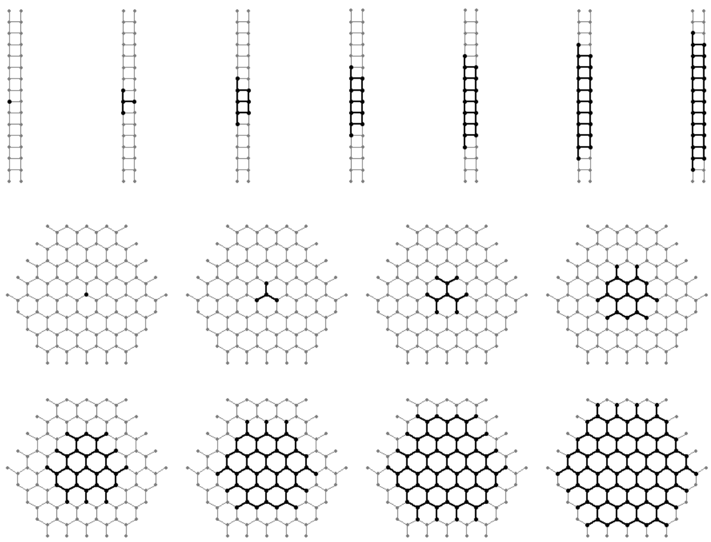
Dovolte mi však, abych se nyní vrátil k fyzice a zejména k základní fyzice. Tradiční matematické přístupy tam měly očividně velký úspěch. Ale stále nám nebyly schopné dát opravdu základní teorii fyziky. Mám podezření, že důvodem je to, že člověk opravdu potřebuje více základů: nejen těch z tradiční matematiky, ale také těch obecnějších. A teď, když jsme viděli, že velmi jednoduché programy mohou produkovat nesmírně bohaté a složité chování, člověk si nemůže pomoci a přemýšlí, zda snad všechny úžasné věci, které vidíme v našem vesmíru, nemohou být jen výsledkem nějakého konkrétního jednoduchého programu. To by bylo docela vzrušující. Mít malý program, který je přesným konečným modelem našeho vesmíru. Takže když někdo spustí ten program dost dlouho, tak to reprodukuje každou věc, která se v našem vesmíru stane. Ale jaký by takový program mohl být? Jedna věc, která je tak trochu nevyhnutelná, je, že jen velmi málo známých rysů našeho vesmíru bude okamžitě viditelné v programu. Prostě tu není místo. Chci říct, pokud je program malý, neexistuje žádný způsob, jak se vejít do samostatných identifikovatelných kusů, které představují elektrony, gravitaci, nebo dokonce prostor nebo čas. A ve skutečnosti si myslím, že pokud má být program opravdu malý, musí mít už zabudovaný co nejmenší stavbu. A například si myslím, že mobilní automat už má zabudované příliš mnoho struktury. Například má celé tuhé pole buněk rozložených ve vesmíru. A také odděluje pojem prostoru od pojmu stavů buněk. Chci říci, že v běžné fyzice je vesmír jakýmsi pozadím a navíc hmota a všechno co existuje. Ale myslím si, že v konečném modelu člověk potřebuje jen prostor a nepotřebuje už žádné jiné základní koncepty.

Takže vzhledem k tomu, co by mohlo být prostorem? Normálně si myslíme, že prostor je jen *něco, co* je – ne něco, co má nějakou základní strukturu. Ale myslím, že je to trochu jako to, co se děje s tekutinami. Naše každodenní zkušenost je, že něco jako voda je kontinuální tekutina. Ale ve skutečnosti víme, že pod tím je spousta malých diskrétních molekul. A myslím, že něco podobného se děje s vesmírem. A že v dostatečně malém měřítku je prostor jen obrovskou sbírkou diskrétních bodů. Ve skutečnosti neuvěřitelně obrovská síť - s měnícím se vzorem spojení mezi body. Jediné, co je zadáno, je způsob, jakým je každý uzel – každý bod – propojen s ostatními.

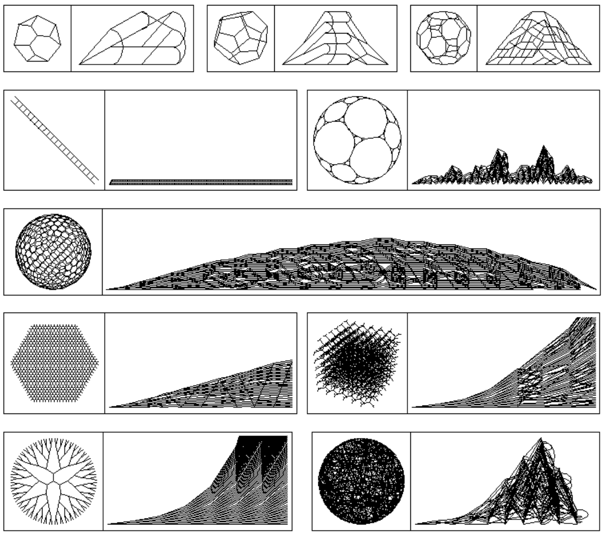
Ale jak může něco jako prostor, jak ho známe, pocházet z toho? Jsou zde sítě, které odpovídají jedno, dvou a trojrozměrnému prostoru.



A ve skutečnosti se jedná o stejný druh sítě: jediná věc, která je odlišná, je vzorec připojení v nich. Ilustroval jsem je, aby byla korespondence s obyčejným prostorem jasná. Ale v síti nejsou ze své podstaty absolutně žádné informace o tom, jak by měla být nakreslena. Je to jen hromada uzlů s určitým vzorcem spojení. Tak jak vůbec řekneme, jestli jsme v určité dimenzi vesmíru? Stačí začít u uzlu a vyjděte z jeho připojení.

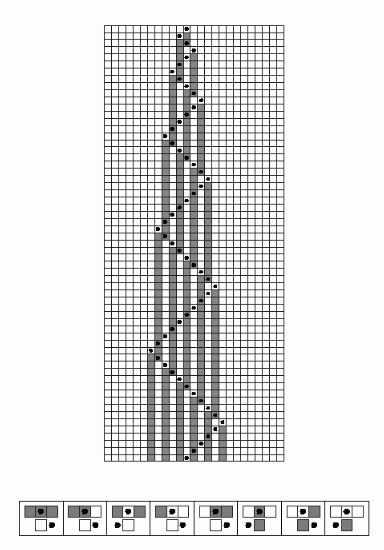


A spočítejte si, kolik uzlů člověk dosáhne. Ve dvou rozměrech to bude zhruba oblast kruhu. Ve třech rozměrech objem koule.



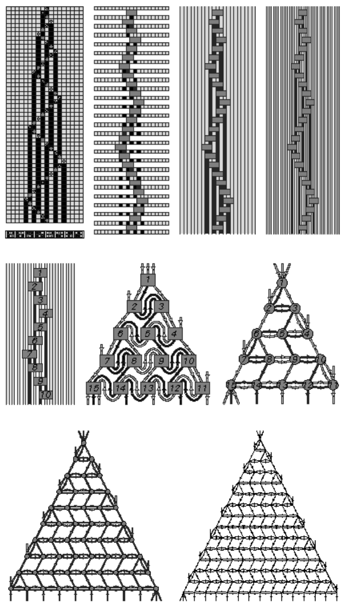
A co čas? V obvyklé matematické formulaci fyziky jsou prostor a čas vždy spojené věci - jen různé proměnné odpovídající různým rozměrům. Ale když se člověk podívá na programy, zdá se, že jsou mnohem odlišnější. Například v mobilním automatu se pohybuje tím, že přechází z jedné buňky do druhé. Člověk se pohybuje v čase tím, že skutečně aplikuje pravidlo mobilního automatu. Může být prostor a čas opravdu tak odlišný? Je to všechno dost ošemetné, ale myslím, že na nejnižší úrovni opravdu jsou. Rozhodně to ale není jako v mobilním automatu. Protože v mobilním automatu je nějaký druh globálních hodin s každou buňkou, která se aktualizuje paralelně při každém obsazení.

Je těžké si představit takové globální hodiny v našem vesmíru. Tady je něco, co se na první pohled zdá šílené. Co kdyby vesmír fungoval trochu jako Turingův stroj, nebo to, čemu říkám mobilní automat, kde na každém kroku je jen jedna buňka, která se aktualizuje?

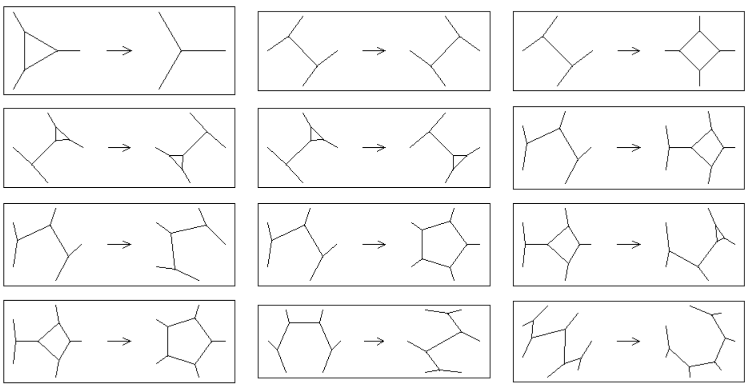


Tady není problém se synchronizací, protože je jen jedno místo, kde se něco děje najednou. Koneckonců, běžně máme dojem, že všechno tak nějak prochází časem společně. Rozhodně nemám dojem, že to, co se děje například, je to, že nejprve budu aktualizován a tak dále. Ale jde o to, jak to mám vědět? Protože dokud nebudu aktualizován, nemůžu říct, jestli jste byli aktualizováni nebo ne.

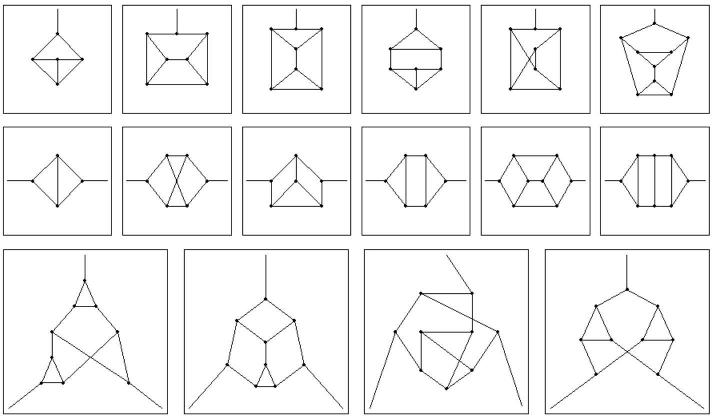
Když to sledujeme celou cestu, uvědomíme si, že všechno, o čem se nakonec můžeme skutečně dovědět, je jakási kauzální síť toho, jaká událost ovlivňuje kterou jinou událost. A tady je příklad, jak lze přejít ze základní posloupnosti aktualizací – v tomto případě v mobilním automatu – do kauzální sítě. A důležité je, že i když aktualizace ovlivňují pouze jednu buňku najednou, konečná kauzální síť odpovídá něčemu jednotnému v časoprostoru.



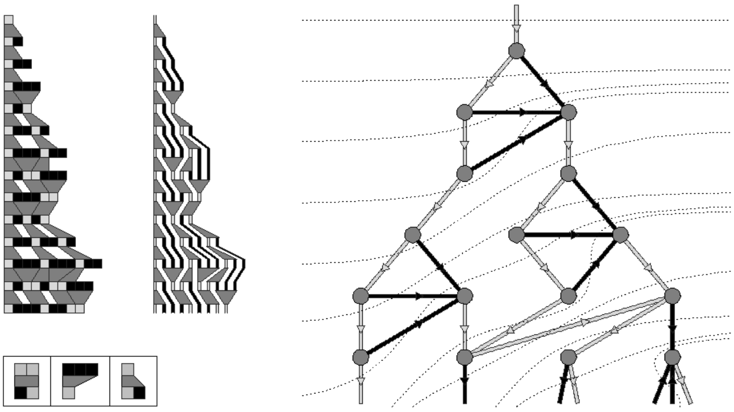
Jak by mohl čas fungovat v kontextu vesmírných sítí, o kterých jsem mluvil předtím? Je zřejmé, že existuje pravidlo aktualizace, které říká, že kdykoli existuje síť, která má určitou formu, měla by být nahrazena kusem sítě s jinou formou. Zde je několik příkladů pravidel.



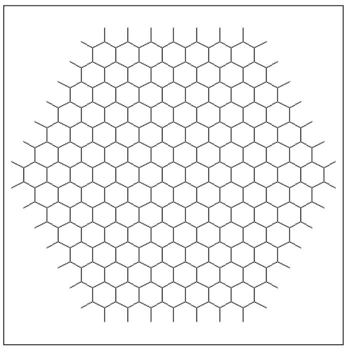
Ale je tu okamžitý problém: pokud je v síti několik míst, kde by mohlo platit konkrétní pravidlo, kde by se mělo aktualizovat jako první? Obecně platí, že různé objednávky aktualizací povedou k různým sítím. A člověk dostane celý strom možných dějin vesmíru. A pak říct, co se vlastně děje v našem vesmíru, pro to bude člověk muset mít více informací, aby řekl, na které větvi je. Nemyslím si, že je to moc věrohodné. A ukázalo se, že je tu další, dosti jemná možnost. Ukazuje se, že s příslušnými druhy základních pravidel ve skutečnosti nezáleží na tom, v jakém pořadí se aplikují: existuje to, co nazývám kauzální invariance, což znamená, že kauzální síť, kterou člověk dostane ven, je vždy stejná. Technicky to souvisí s takzvaným soutokem v přepisových systémech. Stejně jako způsob, jakým lze najít kanonické formy pro výrazy. Ale znamená to, že když člověk používá pravidla založená například na grafech, jako jsou tato, má kauzální neměnnost, a tak v jistém smyslu je ve vesmíru vždy jen jedno vlákno času.

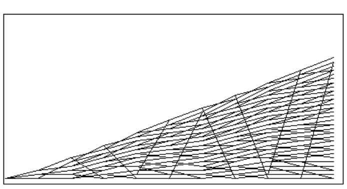


Kromě toho, že existuje jediné vlákno času, to má další důležitý důsledek: ukazuje se, že zvláštní relativita musí platit. Je to trochu komplikovaný příběh, ale pro ty, kteří o takových věcech vědí, dovolte mi jen říci, že různé příkazy aktualizace odpovídají různým vesmírným hyperplochám.

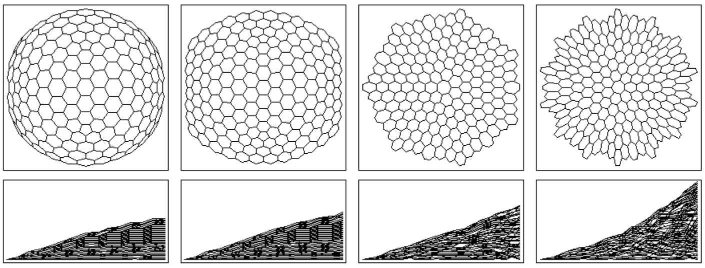


A to je důvod, proč s výhradou různých ošemetné otázky limitů, průměrů a věcí – kauzální invariance znamená relativistickou neměnnost. A co obecná relativita─ standardní teorie gravitace? Člověk musí začít tím, že bude mluvit o zakřivení ve vesmíru. Tady je příklad sítě, která odpovídá plochému dvourozměrnému prostoru.





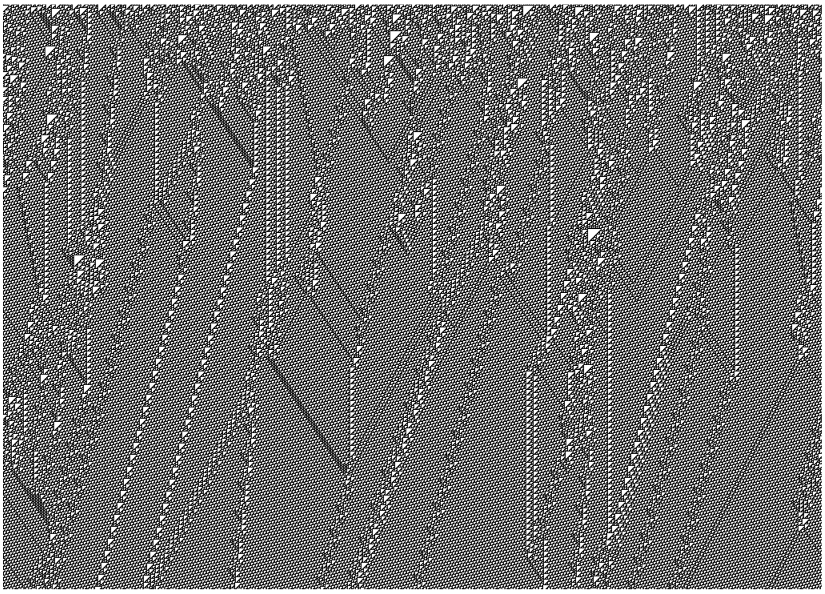
Ale když změníme spojení tak, aby se smíchaly v nějakých sedmi či pětiúhelnících, dostaneme prostor, který má zakřivení.



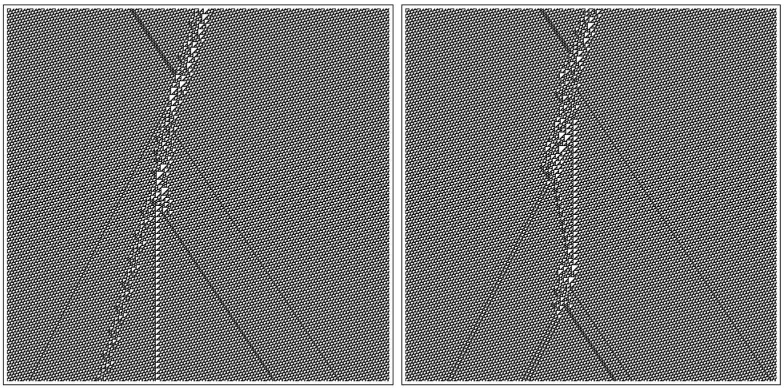
Nezapomeňte, že ve dvou rozměrech počet uzlů, které dostaneme po vzdálenosti roste jako mocnina té vzdálenosti. V obyčejném plochém prostoru je to přesně přesně druhá mocnina vzálenosti. Ale v zakřiveném prostoru je korekce. Úměrné tomu, čemu se říká Ricciho skalární. No, to už je docela zajímavé - protože Ricciho skalární je něco, co se objevuje v Einsteinových rovnicích pro obecnou relativitu.

Celý příběh je dost komplikovaný. Musíme se podívat na zakřivení nejen ve vesmíru, ale i v časoprostoru definovaném kauzálními sítěmi. Ale pak se ukáže, že rychlost růstu objemů časoprostorových kuželů souvisí s takzvaným Ricciho tenzorem. A pak – s určitou mikroskopickou náhodností a dalšími podmínkami – lze odvodit podmínky na Ricciho tenzoru. A - hádejte co - vypadají přesně jako Einsteinovy rovnice. Existuje mnoho problémů. Zdá se, že téměř z ničeho je možno odvodit hlavní rys našeho vesmíru, jmenovitě obecnou relativitu a gravitaci.

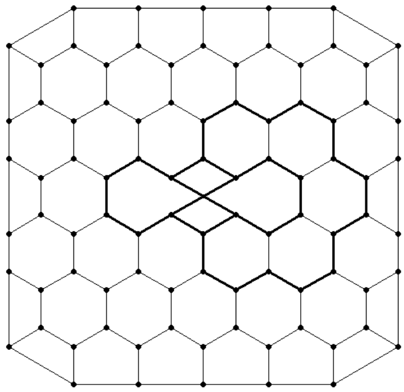
Další velká věc v našem vesmíru jsou částice, jako elektrony a fotony a tak dále. Vše, co ve vesmíru máme je prostor. Tak jak můžeme získat částice? Takhle to může fungovat v něčem jako mobilní automat. Toto je pravidlo 110.



Začíná náhodnými počátečními zaplněními buněk. Ale rychle se organizuje do několika trvalých lokalizovaných struktur. Což se chová jako částice. Jako by mezi nimi došlo k několika srážkám.



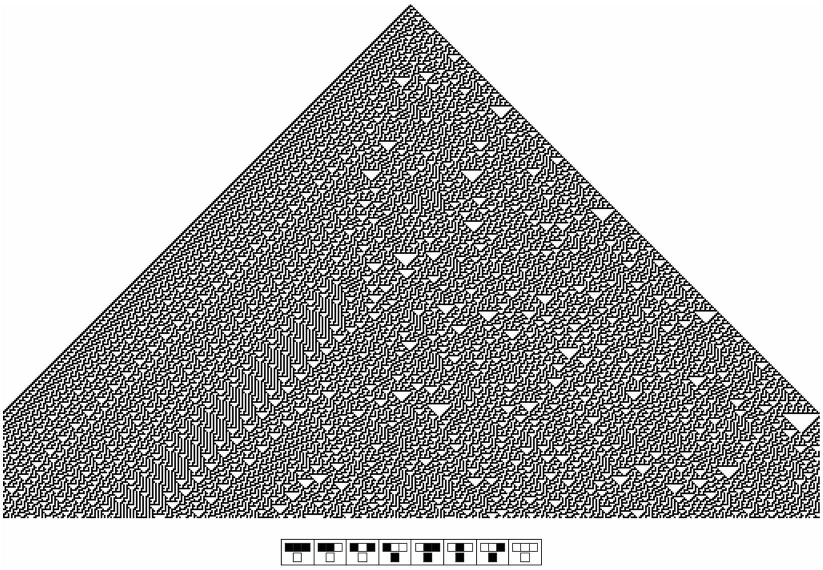
Přijdou dvě částice a po nějakých interakcích vyjde spousta částic. Je to jako explicitní verze Feynmanova diagramu v částicové fyzice. A co v síti? Je to to samé. Kde částice jsou jako určité malé spleti - jako tento neplánární kus v jinak rovinné síti.



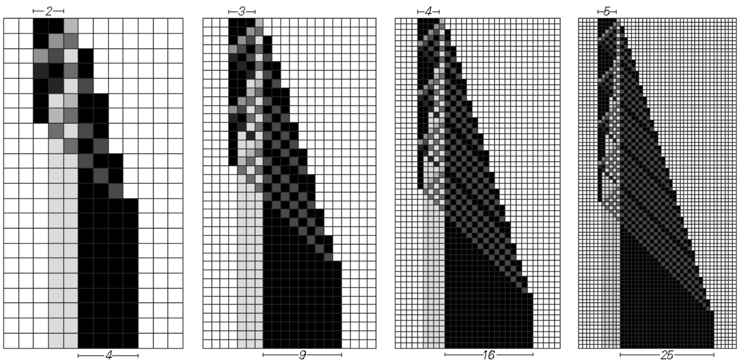
Mluvení o částicích vyvolává kvantovou mechaniku. A už tady vidíme malý náznak kvantovosti. Druh delokalizace, kde můžeme přesunout částici jen překreslením sítě. Ale kvantová mechanika je opravdu velký svazek matematických výsledků a konstrukcí. A vlastně si myslím, že bude snazší přejít od mé základní teorie ke kvantové teorii pole než ke kvantové mechanice - stejně jako je snazší přejít od molekulární dynamiky k mechanice tekutin než k mechanice tuhého těla. Ale jedním z obecných rysů kvantové mechaniky je, že má zabudovanou základní náhodnost. Ale moje teorie je naprosto deterministická. Jde však o to, že si vytváří vlastní náhodnost – jako v pravidle 30. A ve skutečnosti tato náhodnost není důležitá jen pro kvantovou mechaniku. Je také potřeba vybudovat prostor a čas. Přesto by si člověk mohl myslet, že s determinismem pod ním by nikdy nemohl získat takové zvláštní korelace, které jsou pozorovány v kvantové mechanice. Ale ukázalo se, že teorémy o tom závisí na implicitních předpokladech o časoprostoru. Což platí pro sítě. Kde mohou být závity na dlouhé vzdálenosti, které spojují částice, tak trochu mimo obvyklou 3+1 dimenzionální časoprostorovou strukturu.

Je úžasné, kolik sofistikovaných vlastností známé fyziky pochází z těchto jednoduchých síťových programů.

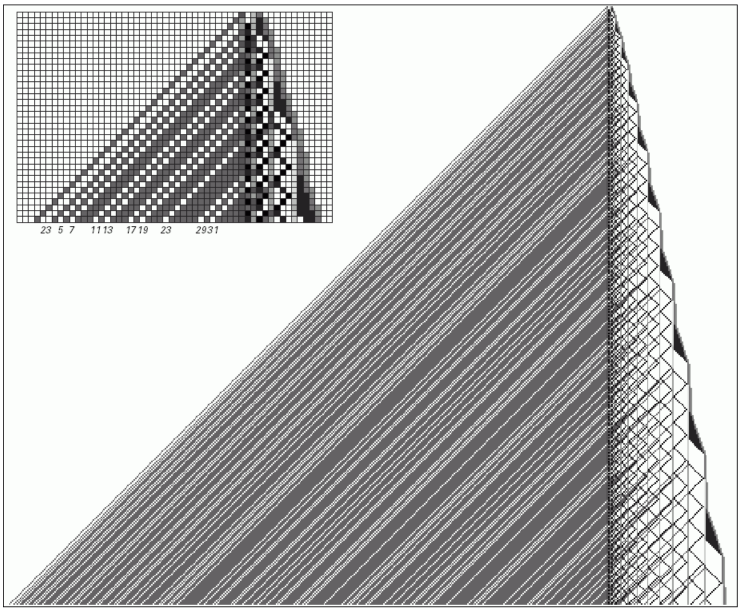
Chci se ještě jednou vrátit k původnímu objevu, který spustil vše, o čem jsem mluvil: objev, že i jednoduché programy - jako pravidlo 30 - mohou produkovat nesmírně složité chování.



Proč se to děje? Jaký je základní důvod? Abychom na to odpověděli, musíme nastavit poněkud nový koncepční rámec. A základem toho je přemýšlet o všech procesech jako o výpočtech. Počáteční podmínky pro systém jsou vstup. A chování, které je generováno, je výstup. Někdy jsou výpočty u kterých okamžitě víme, o co jde. Například zde je mobilní automat, který vypočítá čtverec libovolného čísla.

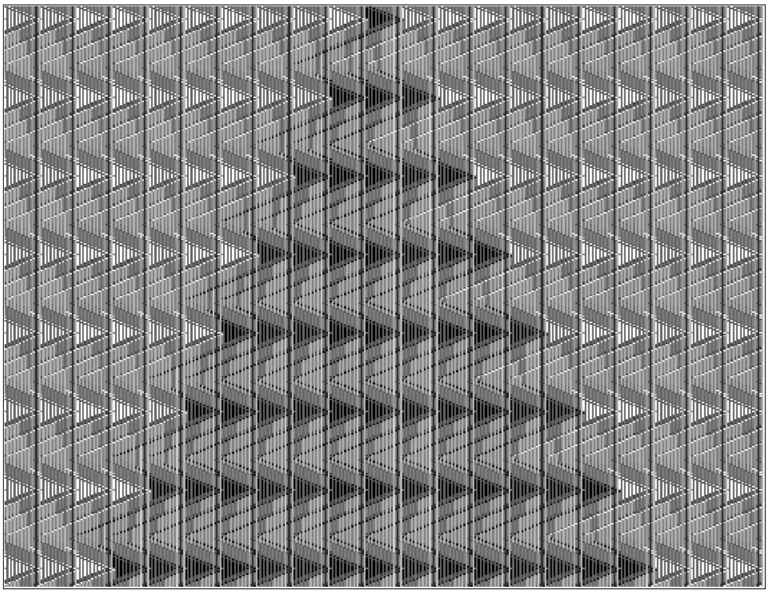


A tady zas mobilní automat, který generuje prvočísla.

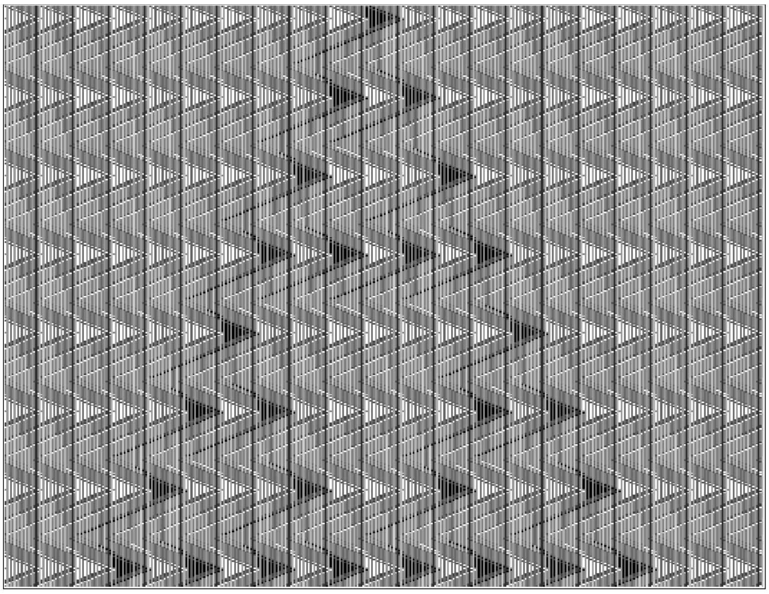


Ve skutečnosti lze jakýkoli mobilní automat myslet jako výpočet. Jen to nemusí být nutně výpočet o kterém víme předem. Takže máme všechny druhy systémů, které dělají všechny druhy výpočtů. Ale jak si stojí všechny tyto výpočty? Možná jsme si mysleli, že každý jiný systém bude vždy dělat úplně jiný druh výpočtu. Ale pozoruhodná myšlenka byla, že je možné vytvořit univerzální stroj, který dokáže provést jakýkoli výpočet, pokud má ten správným vstup. A samozřejmě to byl dost důležitý nápad. Protože je to myšlenka, která umožňuje tvorbu výpočetních programů, a ve skutečnosti je to myšlenka, která spustila celou počítačovou revoluci. Přesto v minulosti tato myšlenka nikdy neměla na přírodní vědy příliš zásadní vliv.

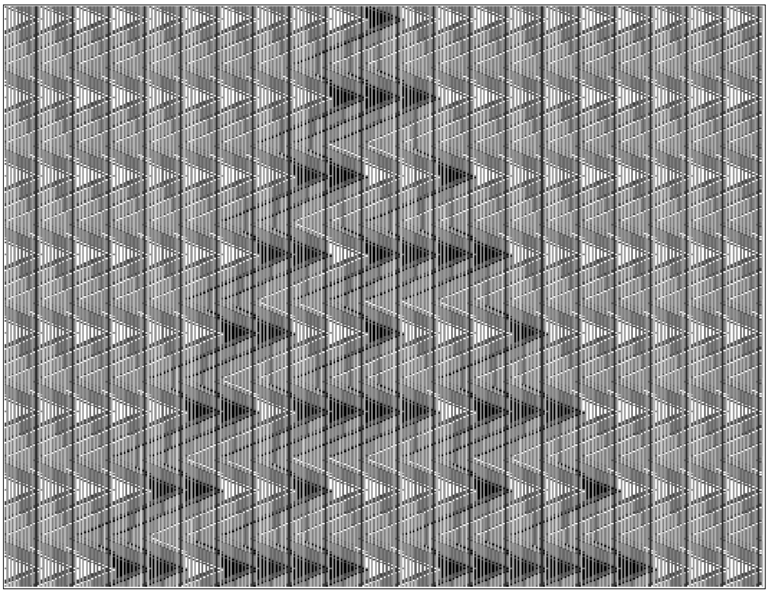
Promluvme si o tom, co to znamená být univerzálním systémem. V podstatě jde o to, že s vhodným vstupem může být systém naprogramován tak, aby se choval jako jakýkoli jiný systém. Zde je příklad: univerzální mobilní automat.



Změnou počátečních podmínek může být tento jediný buněčný automat vyroben tak, aby se choval jako jakýkoli jiný mobilní automat. Tady se chová jako pravidlo 90.



A tady se chová jako pravidlo 30.

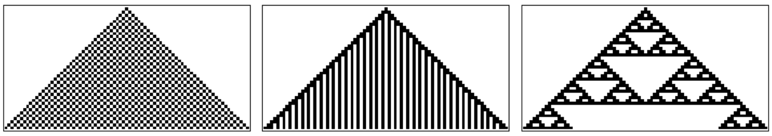


A pamatujte, každý z těchto obrázků je ze stejného univerzálního mobilního automatu se stejnými základními pravidly. Ale děje se to, že tím, že dáváme různé počáteční podmínky, efektivně programujeme univerzální buněčný automat, abychom napodobili všechny druhy jiných mobilních automatů. A ve skutečnosti je schopen napodobit absolutně jakýkoli jiný buněčný automat, s jakýmikoli pravidly.

Člověk by si mohl myslet, že systém bude schopen napodobit pouze systémy, které jsou nějak jednodušší než on sám. Univerzálnost však znamená, že můžeme mít pevný systém, který dokáže napodobit jakýkoli jiný systém, ať už je jakkoli komplikovaný.

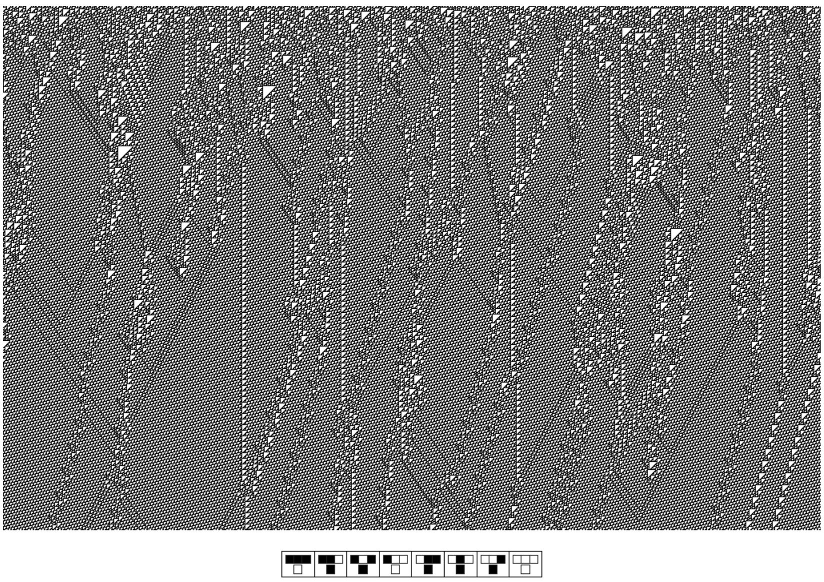
A co všechny ty různé mobilní automaty jako pravidlo 30? Nebo všechny systémy, které vidíme v přírodě? Jak sofistikované jsou výpočty, které dělají?

Strávil jsem dlouhou dobu přemýšlením o tom a shromažďováním nejrůznějších důkazů. A nakonec jsem došel k závěru, jenž se zprvu zdá docela překvapivý. Říkám tomu Princip výpočetní ekvivalence. Je to velmi obecný princip a říká, že v podstatě kdykoli se nám chování systému zdá složité, skončí to jako výpočet přesně rovnocenné sofistikovanosti. Pokud vidíme chování, které se opakuje nebo je vnořené, pak je docela zřejmé, že odpovídá jednoduchému výpočtu.



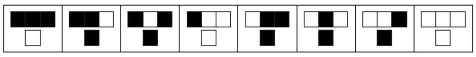
Ale princip výpočetní ekvivalence říká, že když nevidíme takové pravidelnosti, téměř vždy se zabýváme procesem, který je v jistém smyslu maximálně výpočetně sofistikovaný. To je docela překvapivé. Protože jsme si mohli myslet, že propracovanost výpočtů, které se vykonají, bude záviset na propracovanosti pravidel, která byla do toho zasažená. Ale princip výpočetní ekvivalence říká, že ne. A to nám okamžitě dává předpověď. Platí, že i když jsou jejich pravidla extrémně jednoduchá, systémy jako pravidlo 30 jsou univerzální.

Normálně bychom si představovali, že abychom dosáhli něčeho tak sofistikovaného, jako je univerzálnost výpočtu, potřebovali bychom sofistikovaná základní pravidla. A počítače, které používáme a které jsou univerzální, mají čipy s miliony bran a tak dále. Ale princip výpočetní ekvivalence říká, že to vše není třeba. I mobilní automaty s velmi jednoduchými pravidly by měly být univerzální. Tady je jeden z nich. Tohle je pravidlo 110.



Má to opravdu jednoduché pravidlo. Ale jak vidíte, dělá to dost komplikované věci. Pobíhaly tu všechny ty struktury, které vypadaly, že by mohly dělat logické operace nebo tak něco. Ale může je člověk opravdu sestavit, aby získal něco, co vidí, že je univerzální? Může, což znamená, že pravidlo 110 je skutečně univerzální! To je přesně to, co princip výpočetní ekvivalence říká, že by měla být pravda.

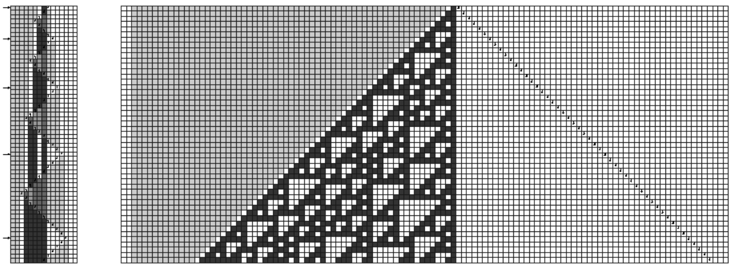
Je to opravdu pozoruhodná věc. Protože to ve své podstatě znamená, že toto malé pravidlo

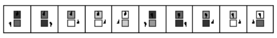


může ve skutečnosti vytvářet chování, které je stejně složité jako jakýkoli jiný systém. Člověk nepotřebuje nic jako celý počítačový procesor, aby mohl dělat univerzální výpočty. Člověk potřebuje jen tohle malé pravidlo. A to má některé velmi důležité důsledky, pokud jde o myšlení o přírodě. Protože bychom neočekávali, že najdeme celé počítačové procesory, které se jen tak povalují v přírodě, ale rozhodně můžeme očekávat, že najdeme věci s pravidly, jako je pravidlo 110. A to například znamená, že mnoho každodenních systémů v přírodě bude pravděpodobně univerzálních.

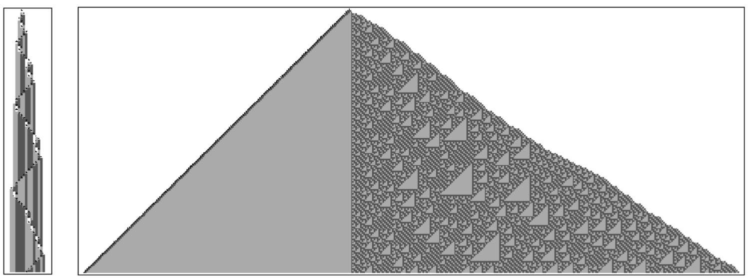
Mimochodem, po 40 let to byl nejjednodušší Turingův stroj, o které se vědělo, že je univerzální.

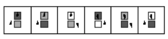
Ale teď víme, že tento mnohem jednodušší turing stroj je ve skutečnosti univerzální.





Jsem přesvědčen, že člověk může jít ještě dál - a že tato malá věc je nejjednodušší Turingův stroj, který je univerzální.





Je toho hodně, co se dá říci o principu výpočetní ekvivalence a co to pro nás znamená. S neuvěřitelně jednoduchými pravidly se často dostane jen jednoduché chování, které je, řekněme, opakující se nebo vnořené. Jde však o to, že pokud někdo pravidla ještě trochu zkomplikuje, pak princip výpočetní ekvivalence říká, že člověk okamžitě překročí práh a skončí se systémem, který je maximálně výpočetně sofistikovaný.

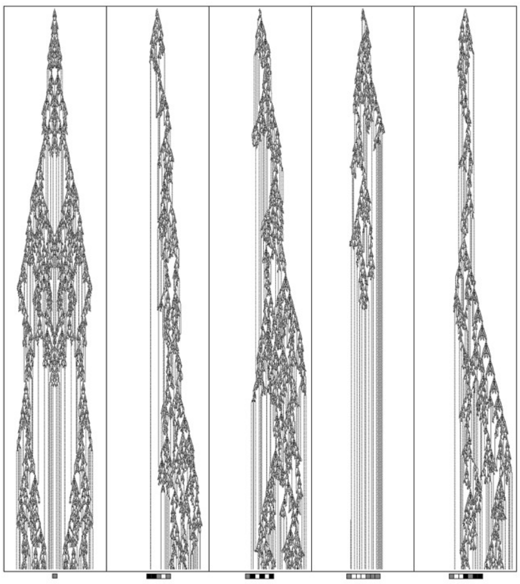
Princip jde vlastně ještě dál. Normálně, když člověk mluví o univerzálním výpočtu, představuje si, že je schopen nastavit jakékoli počáteční podmínky, které chce. Ale princip výpočetní ekvivalence říká, že to není nutné. Protože i když jsou počáteční podmínky jednoduché, stále obvykle dojde k maximálně sofistikovaným výpočtům.

Co to všechno znamená? No, za první věc nám to dává způsob, jak odpovědět na původní otázku, jak něco jako pravidlo 30 dokáže ukázat chování, které se zdá být tak složité.

Jde o to, že vždy existuje soutěž mezi pozorovatelem a systémem, který pozorují. A pokud je pozorovatel nějakým způsobem výpočetně sofistikovanější než systém, pak může v jistém smyslu dekódovat, co systém dělá. Tak to bude připadat jednoduše. Ale princip výpočetní ekvivalence říká, že ve většině případů bude pozorovatel přesně výpočetně ekvivalentní systému, který pozorují. A to je důvod, proč se jim chování systému nevyhnutelně bude zdát složité.

Související důsledek principu výpočetní ekvivalence je velmi důležitý jev, který nazývám výpočetní nesmiřitelností. Řekněme, že znáte pravidla a počáteční podmínky systému. Pak určitě můžete přijít na to, co systém udělá tím, že ho necháte proběhnout. Otázkou však je, zda můžete tento proces nějak zkrátit. Můžete například vytvořit vzorec pro to, co se stane v systému, aniž byste museli explicitně sledovat každý krok? Pokud můžete, pak to znamená, že můžete přijít na to, co systém udělá s mnohem menším výpočetním úsilím, než vyžaduje samotný systém. A tento druh výpočetní redukovatelnosti je jádrem většiny tradičních teoretických věd.

Pokud chcete zjistit, kde bude idealizovaná Země za milion let, nemusíte sledovat všechny její miliony oběžných drah; stačí připojit číslo do vzorce a získat výsledek. Problém je však v tom, co se stane, když je chování složitější? Pokud se systém opakuje, nebo dokonce vnořuje, je snadné to zkrátit. Ale co případ jako je tento?

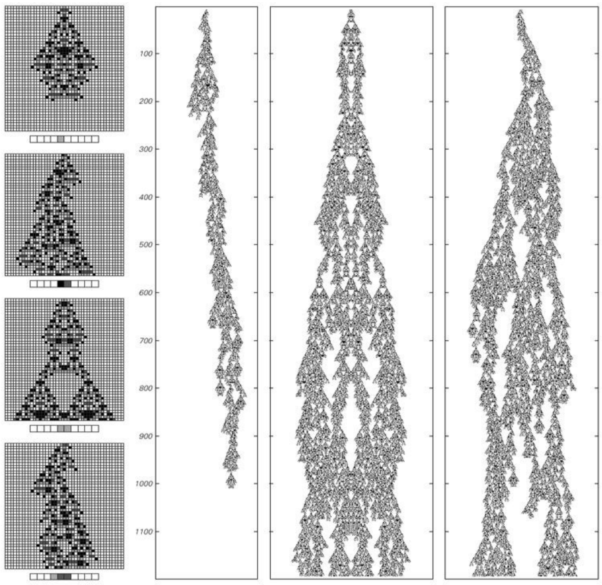


Rozhodně neexistuje žádný zřejmý způsob, jak to zkrátit. A ve skutečnosti si myslím, že je to výpočetně nevýslovné: v podstatě neexistuje způsob, jak zjistit, co systém udělá jakýmkoli postupem, který vyžaduje méně výpočetního úsilí, než jen spuštění systému a uvidíme, co se stane.

V tradiční teoretické vědě došlo k jakési idealizaci, že pozorovatel je nekonečně výpočetně silný ve srovnání se systémem, který pozoruje. Ale jde o to, že když dojde ke složitému chování, princip výpočetní ekvivalence říká, že místo toho je systém stejně výpočetně sofistikovaný jako pozorovatel. A to vede k výpočetní nevýslovnosti. A to je v jistém smyslu důvod, proč tradiční teoretická věda nebyla schopna dosáhnout většího pokroku, když člověk vidí složitost. Vždy existují kapsy redukovatelnosti, kde lze dosáhnout pokroku, ale vždy je zde jádro výpočetní nesmiřitelnosti.

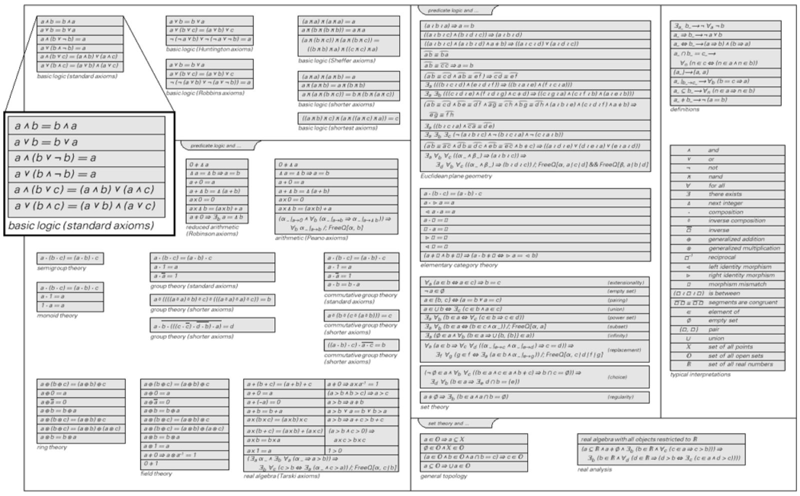
Myslím si, že výpočetní nesmiřitelnost je dost důležitý jev. To je relevantní i nad rámec toho, co je obvykle považováno za čistě vědecké otázky. Jako například problém svobodné vůle. Vždycky se zdálo záhadné, jak se nám daří jednat způsobem, který se zdá být bez zjevných prediktivních zákonů, pokud je to tak, že naše mozky skutečně dodržují určité základní zákony. Myslím si však, že klíčovou složkou odpovědi je výpočetní nezávislost: že i při konkrétních základních zákonech stále neexistuje žádný účinný způsob, jak předpovědět, co systém udělá, s výjimkou toho, že systém bude skutečně spuštěn a uvidíme, co se stane.

Výpočetní nezávislost lze také vnímat jako to, co vede k fenoménu nerozhodnutosti. Viz. mobilní automat

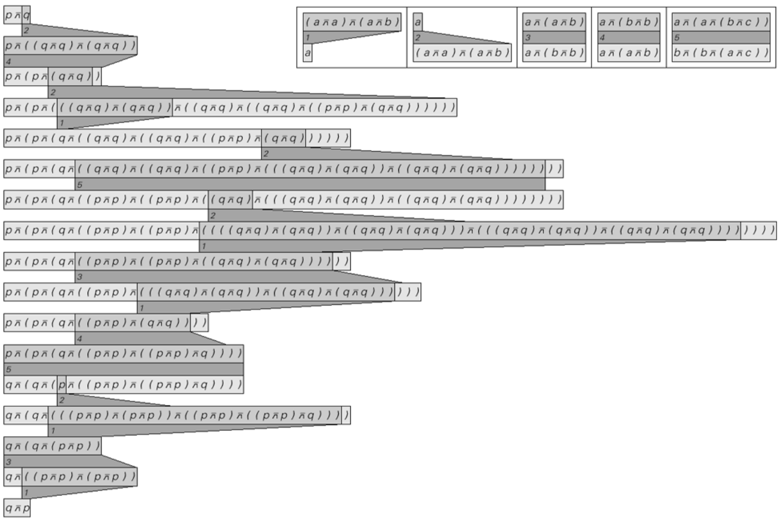


Počínaje danou počáteční podmínkou, vymře vzorec, který byl vytvořen, nakonec vymře, nebo bude prostě pokračovat navždy? V případě vlevo nahoře stačí použít mobilní automat, který říká, že po 36 krocích vymře. Ale ve druhém případě je potřeba 1017 kroků, abychom to zjistili. A v dalších dvou případech, po 10 milionech kroků, stále není jasné, co se stane. A jde o to, že pokud existuje výpočetní neredukovatelnost, neexistuje způsob, jak tuto evoluci zbrzdit – takže neexistuje žádný konečný výpočet, který by vždy přišel na to, co se stane po nekonečném čase. A to znamená, že je obecně formálně nerozhodnutelné, co se stane. O nerozhodnutosti se ví v matematice a v informatice už poměrně dlouho. Ale s principem výpočetní ekvivalence si člověk teď uvědomí, že je také relevantní pro přírodní vědy. Pokud se člověk zeptá na nekonečné časové nebo nekonečné limity velikosti, odpovědi mohou být nerozhodnutelné.

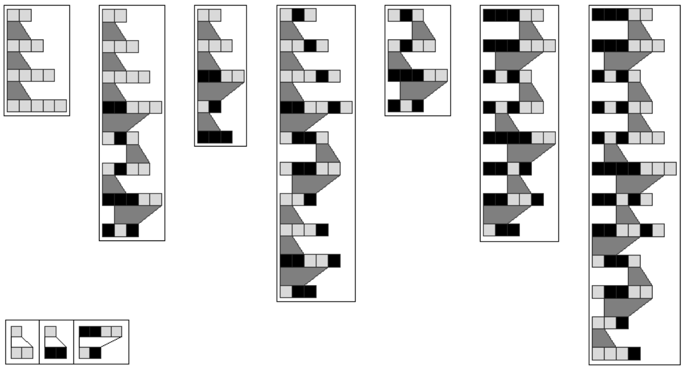
Je tu ještě jeden velké místo, kde si myslím, že výpočetní nesmiřitelnost je velmi důležitá, a to je v základech matematiky. Může to znít docela jasně, ale je to opravdu hluboký postřeh o matematice. Přesto je založen na docela jednoduchých axiomech.



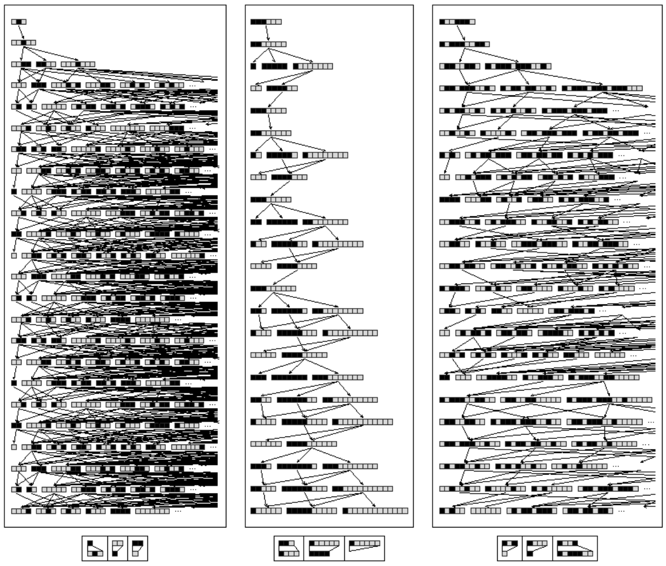
Ale i když jsou tyto axiomy jednoduché, důkazy o věcech, jako je čtyřbarevný teorém nebo Fermatova poslední teorém, jsou opravdu dlouhé. A ukazuje se, že to lze vnímat jen jako další případ fenoménu výpočetní neschovenosti. Zde je příklad jednoduchého důkazu z matematiky.



Jedná se o některé axiomy, které v tomto případě určují ekvivalence v logice. A tohle je důkaz. Začíná to jedním výrazem, pak pokračuje v používání axiomů a nakonec dokazuje teorém, že tento výraz nahoře je ekvivalentní výrazu dole. Takže jako druh minimální idealizace matematiky si lze představit, že axiomy jen definují transformace mezi řetězci. Takže s axiomy zde jsou důkazy o několika teorémech.



Zde je obrázek tří axiomových systémů, který ukazuje síť všech možných transformací.



Způsob, jakým to funguje, každá možná cesta každou sítí odpovídá důkazu nějaké teorémy. Jde o to, že nejkratší cesta z jednoho konkrétního řetězce do druhého může být opravdu dlouhá. A to znamená, že teorém, že struny jsou ekvivalentní, má jen dlouhý důkaz. Když lidé před sto lety přemýšleli o formalizaci matematiky, tak nějak předpokládali, že v každém daném axiom systému bude vždy možné poskytnout důkaz o tom, zda je konkrétní tvrzení pravdivé nebo nepravdivé. V roce 1931 byl velký šok, když Gödelovův teorém ukázal, že to platí pro Peanovu aritmetiku. Gödelovým skutečným úspěchem bylo to. Že v podstatě ukázal, že aritmetika je univerzální, takže zejména může zakódovat jeho prohlášení. Pro základy matematiky byl Gödelův teorém velká věc. Ale nějak za všechny ty roky se to nikdy nezdálo příliš relevantní pro většinu věcí, se kterými se matematici zabývali. A kdybyste potřebovali něco jako Gödelovo prohlášení, abyste získali nerozhodnost, nebylo by to překvapující. Ale jde o to, že princip výpočetní ekvivalence by měl být dostatečně obecný, aby se vztahoval na systémy v matematice. A ještě se tam uvádí, že výpočetní nerozhodnost by ve skutečnosti neměla být vůbec vzácná. Tak kde jsou všechna ta nerozhodnutá prohlášení z matematiky? Už nějakou dobu je známo, že existují celé rovnice, takzvané Diophantinovy rovnice, o kterých existují nerozhodnutelné výroky. Zde je skutečný příklad – Diophantinova rovnice výslovně nastavená tak, aby emulovala pravidlo 110.

$$
\begin{aligned}
&(-3x_6+x_7+x_8)^2+(2^{1+x_3(1+x_1+2x_3)}x_2-2x_4-x_{10}+x_{11})^2+(-2x_8-x_9+x_{10}+x_{11})^2+(1-2^{(1+x_3)(x_1+2x_3)}+x_4+x_{12})^2+\\
&\quad(1-2^{x_1}+x_2+x_{13})^2+(1-2^{x_1}+x_5+x_{14})^2+(-x_4+2^{x_3}x_5+2^{x_1+2x_3}x_6+2^{x_1+x_3}x_{15}+x_{16})^2+(1-2^{x_3}+x_{15}+x_{17})^2+\\
&\quad(1-2^{x_3}+x_{16}+x_{18})^2+(-x_6-2x_7+x_9+x_{19})^2+(-(2+2^{x_6})^{x_6}+(1+2^{x_6})^{x_7}(1+2x_{20}+(1+2^{x_6})x_{21})+x_{22})^2+(1-(1+2^{x_6})^{x_7}+x_{22}+x_{23})^2+\\
&\quad(1-2^{x_6}+2x_{20}+x_{24})^2+(-(2+4^{x_6})^{2x_6}+(1+4^{x_6})^{x_7}(1+2x_{25}+(1+4^{x_6})x_{26})+x_{27})^2+(1-(1+4^{x_6})^{x_7}+x_{27}+x_{28})^2+\\
&\quad(1-4^{x_6}+2x_{25}+x_{29})^2+(-(2+2^{x_8})^{x_8}+(1+2^{x_8})^{x_6}(1+2x_{30}+(1+2^{x_8})x_{31})+x_{32})^2+(1-(1+2^{x_8})^{x_6}+x_{32}+x_{33})^2+\\
&\quad(1-2^{x_8}+2x_{30}+x_{34})^2+(-(2+2^{x_8})^{x_8}+(1+2^{x_8})^{2x_6}(1+2x_{35}+(1+2^{x_8})x_{36})+x_{37})^2+(1-(1+2^{x_8})^{2x_6}+x_{37}+x_{38})^2+\\
&\quad(1-2^{x_8}+2x_{35}+x_{39})^2+(-(2+2^{x_6})^{x_6}+(1+2^{x_6})^{x_9}(1+2x_{40}+(1+2^{x_6})x_{41})+x_{42})^2+(1-(1+2^{x_6})^{x_9}+x_{42}+x_{43})^2+\\
&\quad(1-2^{x_6}+2x_{40}+x_{44})^2+(-(2+4^{x_7})^{2x_7}+(1+4^{x_7})^{x_9}(1+2x_{45}+(1+4^{x_7})x_{46})+x_{47})^2+(1-(1+4^{x_7})^{x_9}+x_{47}+x_{48})^2+\\
&\quad(1-4^{x_7}+2x_{45}+x_{49})^2+(-(2+2^{x_{19}})^{x_{19}}+(1+2^{x_{19}})^{x_6}(1+2x_{50}+(1+2^{x_{19}})x_{51})+x_{52})^2+(1-(1+2^{x_{19}})^{x_6}+x_{52}+x_{53})^2+\\
&\quad(1-2^{x_{19}}+2x_{50}+x_{54})^2+(-(2+2^{x_{19}})^{x_{19}}+(1+2^{x_{19}})^{2x_7}(1+2x_{55}+(1+2^{x_{19}})x_{56})+x_{57})^2+(1-(1+2^{x_{19}})^{2x_7}+x_{57}+x_{58})^2+\\
&\quad(1-2^{x_{19}}+2x_{55}+x_{59})^2+(-(2+2^{x_9})^{x_9}+(1+2^{x_9})^{x_{10}}(1+2x_{60}+(1+2^{x_9})x_{61})+x_{62})^2+(1-(1+2^{x_9})^{x_{10}}+x_{62}+x_{63})^2+(1-2^{x_9}+2x_{60}+x_{64})^2+\\
&\quad(-(2+4^{x_8})^{2x_8}+(1+4^{x_8})^{x_{10}}(1+2x_{65}+(1+4^{x_8})x_{66})+x_{67})^2+(1-(1+4^{x_8})^{x_{10}}+x_{67}+x_{68})^2+(1-4^{x_8}+2x_{65}+x_{69})^2+\\
&\quad(-(2+2^{x_{11}})^{x_{11}}+(1+2^{x_{11}})^{x_9}(1+2x_{70}+(1+2^{x_{11}})x_{71})+x_{72})^2+(1-(1+2^{x_{11}})^{x_9}+x_{72}+x_{73})^2+(1-2^{x_{11}}+2x_{70}+x_{74})^2+\\
&\quad(-(2+2^{x_{11}})^{x_{11}}+(1+2^{x_{11}})^{2x_8}(1+2x_{75}+(1+2^{x_{11}})x_{76})+x_{77})^2+(1-(1+2^{x_{11}})^{2x_8}+x_{77}+x_{78})^2+(1-2^{x_{11}}+2x_{75}+x_{79})^2=0
\end{aligned}
$$

Tohle je očividně dost komplikované a ne něco, co by se objevilo každý den. Ale co jednodušší Diophantinovy rovnice?

$2x+3y=1$	□	
$2x+3y=2$	□	
$2x+3y=3$	□	
$2x+3y=4$	□	
$2x+3y=5$	$x=1$	$y=1$
$2x+3y=6$	□	
$2x+3y=7$	$x=2$	$y=1$
$2x+3y=8$	$x=1$	$y=2$
$2x+3y=9$	$x=3$	$y=1$
$2x+3y=10$	$x=2$	$y=2$
$2x+3y=11$	$x=1$	$y=3$
$2x+3y=12$	$x=3$	$y=2$
$2x+3y=13$	$x=2$	$y=3$
$2x+3y=14$	$x=1$	$y=4$
$2x+3y=15$	$x=3$	$y=3$

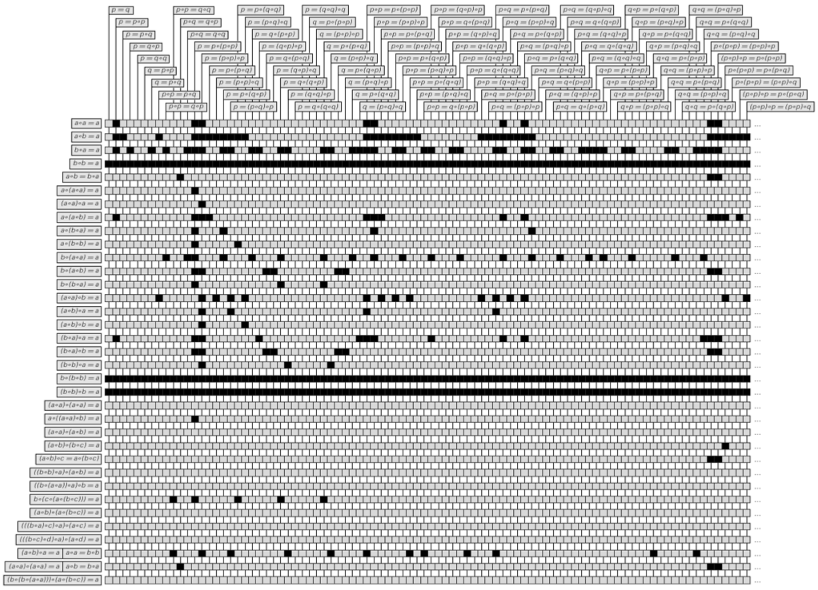
$x^2=y^2+1$	□	
$x^2=y^2+2$	□	
$x^2=y^2+3$	$x=2$	$y=1$
$x^2=y^2+4$	□	
$x^2=y^2+5$	$x=3$	$y=2$
$x^2=y^2+6$	□	
$x^2=y^2+7$	$x=4$	$y=3$
$x^2=y^2+8$	$x=3$	$y=1$
$x^2=y^2+9$	$x=5$	$y=4$
$x^2=y^2+10$	□	
$x^2=y^2+11$	$x=6$	$y=5$
$x^2=y^2+12$	$x=4$	$y=2$
$x^2=y^2+13$	$x=7$	$y=6$
$x^2=y^2+14$	□	
$x^2=y^2+15$	$x=4$	$y=1$
$x^2=y^2+16$	$x=5$	$y=3$

$x^2=y^3-20$	$x=14$	$y=6$
$x^2=y^3-19$	$x=18$	$y=7$
$x^2=y^3-18$	$x=3$	$y=3$
$x^2=y^3-17$	□	
$x^2=y^3-16$	□	
$x^2=y^3-15$	$x=7$	$y=4$
$x^2=y^3-14$	□	
$x^2=y^3-13$	$x=70$	$y=17$
$x^2=y^3-12$	□	
$x^2=y^3-11$	$x=4$	$y=3$
$x^2=y^3-10$	□	
$x^2=y^3-9$	□	
$x^2=y^3-8$	□	
$x^2=y^3-7$	$x=1$	$y=2$
$x^2=y^3-6$	□	
$x^2=y^3-5$	□	
$x^2=y^3-4$	$x=2$	$y=2$
$x^2=y^3-3$	□	
$x^2=y^3-2$	$x=5$	$y=3$
$x^2=y^3-1$	□	
$x^2=y^3$	$x=1$	$y=1$
$x^2=y^3+1$	$x=3$	$y=2$
$x^2=y^3+2$	□	
$x^2=y^3+3$	$x=2$	$y=1$
$x^2=y^3+4$	□	
$x^2=y^3+5$	□	
$x^2=y^3+6$	□	
$x^2=y^3+7$	□	
$x^2=y^3+8$	$x=3$	$y=1$
$x^2=y^3+9$	$x=6$	$y=3$
$x^2=y^3+10$	□	

$x^3=y^4-20xy-1$	$x=10$	$y=7$
$x^3=y^4-19xy-1$	$x=3$	$y=4$
$x^3=y^4-18xy-1$	$x=75$	$y=26$
$x^3=y^4-17xy-1$		
$x^3=y^4-16xy-1$		
$x^3=y^4-15xy-1$	$x=624$	$y=125$
$x^3=y^4-14xy-1$		
$x^3=y^4-13xy-1$		
$x^3=y^4-12xy-1$	$x=3$	$y=2$
$x^3=y^4-11xy-1$		
$x^3=y^4-10xy-1$		
$x^3=y^4-9xy-1$	$x=80$	$y=27$
$x^3=y^4-8xy-1$	$x=12$	$y=7$
$x^3=y^4-7xy-1$	$x=1$	$y=2$
$x^3=y^4-6xy-1$	$x=15$	$y=8$
$x^3=y^4-5xy-1$		
$x^3=y^4-4xy-1$	$x=30$	$y=13$
$x^3=y^4-3xy-1$		
$x^3=y^4-2xy-1$		
$x^3=y^4-xy-1$		
$x^3=y^4-1$	□	
$x^3=y^4+xy-1$	$x=1$	$y=1$
$x^3=y^4+2xy-1$	$x=3$	$y=2$
$x^3=y^4+3xy-1$	$x=5$	$y=3$
$x^3=y^4+4xy-1$	$x=2$	$y=1$
$x^3=y^4+5xy-1$		
$x^3=y^4+6xy-1$		
$x^3=y^4+7xy-1$		
$x^3=y^4+8xy-1$	$x=20$	$y=9$
$x^3=y^4+9xy-1$	$x=3$	$y=1$
$x^3=y^4+10xy-1$		

$x^3+y^3=z^2+1$	$x=1$	$y=1$	$z=1$
$x^3+y^3=z^2+2$	$x=107$	$y=232$	$z=3703$
$x^3+y^3=z^2+3$	$x=1$	$y=3$	$z=5$
$x^3+y^3=z^2+4$	$x=5$	$y=12$	$z=43$
$x^3+y^3=z^2+5$	$x=1$	$y=2$	$z=2$
$x^3+y^3=z^2+6$	$x=7$	$y=24$	$z=119$
$x^3+y^3=z^2+7$	$x=2$	$y=2$	$z=3$
$x^3+y^3=z^2+8$	$x=1$	$y=2$	$z=1$
$x^3+y^3=z^2+9$	$x=3$	$y=7$	$z=19$
$x^3+y^3=z^2+10$	$x=2$	$y=3$	$z=5$
$x^3+y^3=z^3-20$	$x=107$	$y=137$	$z=156$
$x^3+y^3=z^3-19$	$x=14$	$y=16$	$z=19$
$x^3+y^3=z^3-18$	$x=1$	$y=2$	$z=3$
$x^3+y^3=z^3-17$	$x=103$	$y=111$	$z=135$
$x^3+y^3=z^3-16$	$x=10$	$y=12$	$z=14$
$x^3+y^3=z^3-15$	$x=262$	$y=265$	$z=332$
$x^3+y^3=z^3-14$	□		
$x^3+y^3=z^3-13$	□		
$x^3+y^3=z^3-12$	$x=5725013$	$y=9019406$	$z=9730705$
$x^3+y^3=z^3-11$	$x=2$	$y=2$	$z=3$
$x^3+y^3=z^3-10$	$x=3$	$y=3$	$z=4$
$x^3+y^3=z^3-9$	$x=52$	$y=216$	$z=217$
$x^3+y^3=z^3-8$	$x=16$	$y=12$	$z=18$
$x^3+y^3=z^3-7$	$x=605809$	$y=680316$	$z=812918$
$x^3+y^3=z^3-6$	$x=1$	$y=1$	$z=2$
$x^3+y^3=z^3-5$	□		
$x^3+y^3=z^3-4$	□		
$x^3+y^3=z^3-3$			
$x^3+y^3=z^3-2$	$x=5$	$y=6$	$z=7$
$x^3+y^3=z^3-1$	$x=6$	$y=8$	$z=9$
$x^3+y^3=z^3$	□		

Lineární Diophantinovy rovnice byly ve starověku prolomené. Kvadratické kolem roku 1800. A zatím se zdá, že jiný druh je praskající zhruba každých padesát nebo sto let. Ale hádám, že to nebude pokračovat. A že ve skutečnosti se mnoho z aktuálně nevyřešených problémů v teorii čísel ukázalo jako nerozhodnutelné. Dobře, ale proč bylo tolik matematiky úspěšně provedeno, aniž by došlo k nerozhodnosti? Myslím, že je to něco jako teoretická fyzika: má tendenci držet se míst, kde je výpočetní reduktibilita a kde tyto metody mohou dosáhnout pokroku. Ale alespoň v poslední době se matematika pyšní tím, že je velmi obecná. Tak proč se neukázalo pravidlo 30 a pravidlo 110 a všechny jevy, které jsem našel v jednoduchých programech? Myslím, že jedním z důvodů je, že matematika není tak obecná, jak se inzeruje. Abychom zjistili, co by to mohlo být, lze si představit, že bychom jen vyčetli možné axiomové systémy.



Například to ukazuje, jaké teorémy platí pro sekvenci různých axiomových systémů. Je to jako nakonec vysušená forma matematiky: axiomy jdou doleva, teorémy jdou přes vrchol - a pokaždé, když je teorém, který platí pro konkrétní axiomový systém, je tam černá tečka. Je na skutečných axiomových systémech, které se používají v matematice, něco zvláštního? Možná něco, co dělá nerozhodnost méně nekontrolovatelnou? Když se člověk podívá na axiomové systémy z učebnic, jsou obvykle dost komplikované. Tady je logika, například.

$a \wedge b = b \wedge a$
$a \vee b = b \vee a$
$a \wedge (b \vee \neg b) = a$
$a \vee (b \wedge \neg b) = a$
$a \wedge (b \vee c) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c)$
$a \vee (b \wedge c) = (a \vee b) \wedge (a \vee c)$

basic logic (standard axioms)

Už sto let je známo, že tam nemusí být všechny operátořy. Stačí jediný operátor Nand – neboli Shefferova mrtvice. Ale zřejmý axiomový systém s tím je stále dost komplikovaný.

$a \wedge b = b \wedge a$
$a \vee b = b \vee a$
$a \wedge (b \vee \neg b) = a$
$a \vee (b \wedge \neg b) = a$
$a \wedge (b \vee c) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c)$
$a \vee (b \wedge c) = (a \vee b) \wedge (a \vee c)$

basic logic (standard axioms)

$(a \bar\wedge a) \bar\wedge (a \bar\wedge a) = a$
$a \bar\wedge (b \bar\wedge (b \bar\wedge b)) = a \bar\wedge a$
$(a \bar\wedge (b \bar\wedge c)) \bar\wedge (a \bar\wedge (b \bar\wedge c)) = ((b \bar\wedge b) \bar\wedge a) \bar\wedge ((c \bar\wedge c) \bar\wedge a)$

basic logic (Sheffer axioms)

Z intuice, kterou jsem si vybudoval o jednoduchých programech, jsem vyvodil, že by měl existovat opravdu jednoduchý axiomový systém pro logiku - pravděpodobně jen s jedním axiomem. Zde je.

$a \wedge b = b \wedge a$
$a \vee b = b \vee a$
$a \wedge (b \vee \neg b) = a$
$a \vee (b \wedge \neg b) = a$
$a \wedge (b \vee c) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c)$
$a \vee (b \wedge c) = (a \vee b) \wedge (a \vee c)$

basic logic (standard axioms)

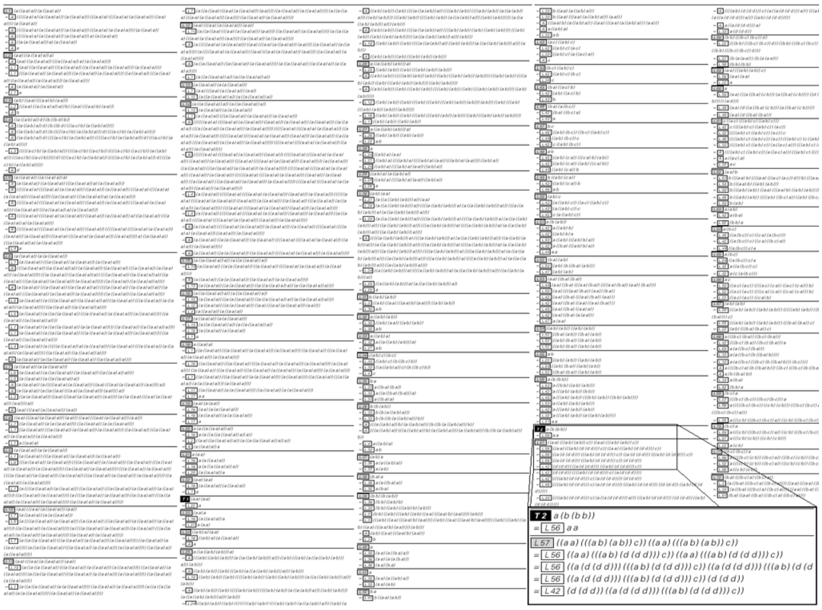
$(a \bar\wedge a) \bar\wedge (a \bar\wedge a) = a$
$a \bar\wedge (b \bar\wedge (b \bar\wedge b)) = a \bar\wedge a$
$(a \bar\wedge (b \bar\wedge c)) \bar\wedge (a \bar\wedge (b \bar\wedge c)) = ((b \bar\wedge b) \bar\wedge a) \bar\wedge ((c \bar\wedge c) \bar\wedge a)$

basic logic (Sheffer axioms)

$((a \bar\wedge b) \bar\wedge c) \bar\wedge (a \bar\wedge ((a \bar\wedge c) \bar\wedge a)) = c$

basic logic (shortest axioms)

A můžu vám říct, že tohle je nejjednodušší možný axiomový systém pro logiku. Mimochodem, tady je důkaz – netřeba dodávat, že je generován počítačem.



Když to vím, můžu říct, že když člověk jen vyčte axiomové systémy, logika bude asi 50,000. Ale co všechny ostatní? No, většina z nich jsou také naprosto rozumné axiomové systémy. Prostě to nejsou známé obory matematiky. A ve skutečnosti si myslím, že matematika, jak byla vyvinuta, byla v jistém smyslu nesmírně omezená: na určité úrovni je to opravdu stále jen různé přímé zobecnění aritmetiky a geometrie, které byly studovány ve starověkém Babylonu. No, když se člověk začne dívat na jednoduché programy a jen experimentovat, okamžitě vidí mnohem širší svět – obrovské zobecnění toho, co matematika doposud byla.

Dovolte mi, abych se nyní obrátil k poněkud jinému tématu. Chci mluvit o tom, co říká Princip výpočetní ekvivalence o tak trochu velké otázce: o našem místě ve vesmíru. No, vždycky pro nás bylo přirozené myslet si, že my jako lidé jsme velmi výjimeční. Ale dějiny vědy nám stále ukazují, jak na tom nejsme. Například před čtyřmi sty lety jsme zjistili, že naše Země není na zvláštním místě ve vesmíru. A před sto a půl lety jsme zjistili, že na původu našeho druhu není nic zvláštního. No, pokaždé, když ztratíme něco zvláštního, věda se stane obecnější – protože může upustit další poznámku pod čarou, která říká "s výjimkou lidí". Ale právě teď si stále často myslíme, že jsme výjimeční v naší úrovni složitosti nebo našich výpočetních schopnostech. Ale jedním z velkých prohlášení, které princip výpočetní ekvivalence činí, je, že to není správné. Říká, že existuje mnoho jednoduchých abstraktních systémů – a systémů v přírodě –, které jsou z hlediska jejich výpočetní propracovanosti naprosto rovnocenné. No, člověk má takový dojem tak jako tak – například když říká něco jako "počasí má svou vlastní mysl". Ale princip výpočetní ekvivalence nyní říká, že ano, plynulé turbulence v atmosféře budou odpovídat stejně sofistikovanému výpočtu jako cokoli, co děláme. Takže v tom nejsme výjimeční.

Jedna z věcí, pro které to má následky, je hledání mimozemské inteligence. Napadlo nás, že kdybychom viděli signál, který byl vytvořen důmyslným výpočtem, pak by nebylo jinou možnost, než dojít k závěru, že pochází ze sofistikované mimozemské inteligence - nějaké mimozemské civilizace. Princip výpočetní ekvivalence říká, ne, ve skutečnosti je snadné dělat sofistikované výpočty – a spousta věcí v přírodě je dělá. A to je mimochodem důvod, proč je tak těžké odlišit náhodný rádiový šum od nějakého inteligentního komprimovaného šifrovaného signálu. Je zajímavé přemýšlet o tom, jak interagujeme s konečnými technologickými limity. Nepochybuji o tom, že naskytne čas - potenciálně docela brzy - kdy bude možné zachytit všechny důležité rysy lidského myšlení v elektronickém mediu. A není pochyb o tom, že věci budou stále efektivnější, dokud nebude vše v atomovém měřítku - takže naše procesy lidského myšlení jsou realizovány pouze jednotlivými elektrony. Princip výpočetní ekvivalence nám říká, že nemůžeme očekávat, že vzory těch, které představují lidské myšlení, budou nakonec o něco sofistikovanější než ty, které se přirozeně vyskytují v něčem jako skála. Neexistuje žádný druh abstraktní podstaty lidské inteligence, kterou by se identifikovala. Ale co je na nás samozřejmě stále zvláštní, jsou všechny naše detaily a celá naše historie. A v jistém smyslu je to princip výpočetní ekvivalence, který nám ukazuje, že historie může opravdu něco sčítat. Protože kdyby bylo všechno výpočetně redukovatelné, pak by v jistém smyslu historie nemohla dosáhnout ničeho: vždy bychom se bez takového úsilí dostali ke stejnému koncovému bodu.

Je zajímavé, co nakonec říká princip výpočetní ekvivalence. Tak nějak to zapouzdřuje jak velkou sílu, tak velkou slabost vědy. Protože na jedné straně se říká, že všechny zázraky našeho vesmíru mohou být zachyceny jednoduchými pravidly. Ale také říká, že nakonec neexistuje způsob, jak poznat důsledky těchto pravidel, s výjimkou skutečnosti jen sledovat jak se vyvíjejí.

Jednoho dne si myslím, že to bude jako fyzika, chemie nebo matematika. Ale zajímá se o pochopení toho, co je tam venku ve výpočetním světě. To je něco jako "čistá NKS.". A z toho čistého NKS se může začít dělat aplikace. Vezměte výsledky a metody NKS a použijte je ve vědě, v technologii i jinde. Protože teď má člověk spoustu nových surovin pro vytváření modelů věcí – možná včetně celého našeho vesmíru. Ale také spousta nových směrů pro technologii. Protože teď máme všechny tyto nové mechanismy – nejen ozubená kola, ale také věci jako pravidlo 30 –, které nám dávají nové způsoby, jak přistupovat k vytváření algoritmů nebo k umělé biologii, nanotechnologiím nebo tak něco.

Je tu také jakýsi koncepční směr. Porozumění více o základním charakteru vědy a matematiky a o místě, které máme v našem vesmíru. A v jistém smyslu dává nový rámec pro přemýšlení o věcech obecně, ať už pro filozofii nebo podnikání. A dát například nový základ pro základní vlákno ve vzdělávání, něco jako alternativu k matematice. Nebo vytváření nových forem umění, hudby nebo architektury. Je tu tolik možností. Tolik věcí, které je třeba udělat. Tolik věcí, které je třeba objevit.

Je to vzrušující doba. Něco jako rozmach celého intelektuálního průmyslu. A existuje mnoho způsobů, jak to použít. Člověk se může pokusit klasifikovat a systematizovat a dělat základní výzkum. Ale lze také dělat aplikace. Řekněme, že jeden má nějaký fenomén. A člověk pro to chce najít model. No, obecně je to velmi těžké. Ale je tu pozoruhodná věc: pokud existuje model, který je dostatečně jednoduchým programem, pak ho lze jen hledat. Člověk se může podívat do Atlasu – podívat se do bilionu možností nebo tak něco – a jen tu a tam najít dobrý model.

Nic takového by nebylo myslitelné u tradičních druhů modelů protože jsou příliš komplikované. Ale s jednoduchými programy je to jiný příběh. Možná to bude fungovat i při hledání modelu pro celý náš vesmír. Ale řekněme, že jeden má jen nějakou posloupnost celého čísla. Pak by vám Atlas mohl říct nejjednodušší program, který může rychle vytvořit tuto sekvenci.

Ale Atlas není jen pro vědu. Může být také těžen pro technologii. Hledání snadných způsobů, jak budovat složité struktury, pro nanotechnologie nebo bioinženýrství nebo cokoli jiného. Nebo hledání algoritmů: pro kryptografii, kompresi nebo porovnávání vzorů nebo cokoli jiného. Víte, většina algoritmů, které dnes máme, byla vyrobena explicitním inženýrstvím. A na určité úrovni jsou založeny na docela jednoduchém chování. Jako iterace nebo rekurze, což odpovídá opakování nebo hnízdění. Ale pokud jen systematicky prohledáváte první bilion Turingových strojů, zjistíte, že se děje spousta dalších věcí a potenciálně spousta užitečných algoritmů. Jen tam venku ve výpočetním vesmíru. Připraveno k vytěžení. Jakmile k tomu má člověk nástroje a porozumí vědě.