

Did our cosmos exist before the big bang?

ABHAY ASHTEKAR remembers his reaction the first time he saw the universe bounce. "I was taken aback," he says. He was watching a simulation of the universe rewind towards the big bang. Mostly the universe behaved as expected, becoming smaller and denser as the galaxies converged. But then, instead of reaching the big bang "singularity", the universe bounced and started expanding again. What on earth was happening?

Ashtekar wanted to be sure of what he was seeing, so he asked his colleagues to sit on the result for six months before publishing it in 2006. And no wonder. The theory that the recycled universe was based on, called loop quantum cosmology (LQC), had managed to illuminate the very birth of the universe - something even Einstein's general theory of relativity fails to do.

LQC has been tantalizing physicists since 2003 with the idea that our universe could conceivably have emerged from the collapse of a previous universe. Now the theory is poised to make predictions we can actually test. If they are verified, the big bang will give way to a big bounce and we will finally know the quantum structure of space-time. Instead of a universe that emerged from a point of infinite density, we will have one that recycles, possibly through an eternal series of expansions and contractions, with no beginning and no end.

LQC is in fact the first tangible application of another

Czy wszechświat istniał już przed Wielkim Wybuchem?

– Byłem zaskoczony – opowiada Abhay Ashtekar, opisując swoją reakcję na zjawisko zwane przez naukowców „Wielkim Odbiciem” (z ang. Big Bounce). Zjawisko to zaobserwował podczas symulacji, w której czas cofał się do momentu Wielkiego Wybuchu. Wszechświat zachowywał się pod większością względów w sposób zgodny z oczekiwaniami – kurczył się i wraz ze zbieganiem galaktyk stawał się coraz gęstszy. Jednak następnie zamiast osiągnąć stan sformułowany w teorii Wielkiego Wybuchu jako "osobliwość", wszechświat „odbił się” i ponownie zaczął się rozszerzać. Co się stało?

Ashtekar, chcąc upewnić się, że zjawisko, które zaobserwował, ma odzwierciedlenie w rzeczywistości, poprosił swoich współpracowników o poświęcenie sześciu miesięcy na sprawdzenie otrzymanych wyników, które następnie zostały opublikowane w 2006 roku. Nie ma się czemu dziwić. Teoria, na której opiera się „odtworzony” wszechświat, czyli pętlowa kosmologia kwantowa (ang. loop quantum cosmology – LQC), rzuciła światło na narodziny wszechświata, dokonując czegoś, czemu nie była w stanie sprostać nawet ogólna teoria względności Einsteina.

Od 2003 roku teoria pętlowej kosmologii kwantowej działa na wyobraźnię fizyków, sugerując, że nasz wszechświat mógł powstać w wyniku zapadnięcia się uprzednio istniejącego wszechświata. Dziś powstałe na podstawie tej teorii prognozy można poddać weryfikacji. Jeśli zostaną one potwierdzone, teoria Wielkiego Wybuchu będzie musiała ustąpić miejsca teorii Wielkiego Odbicia, ujawniając w końcu kwantową strukturę czasoprzestrzeni. Wszechświat, który wyłonił się z punktu o nieskończonej gęstości, zostanie zastąpiony przez wszechświat, który ulega „odtworzaniu”, najprawdopodobniej w wyniku odwiecznego cyklu rozszerzania i kurczenia, który nie ma ani początku ani końca.

W rzeczywistości pętlowa kosmologia kwantowa jest

theory called loop quantum gravity, which cunningly combines Einstein's theory of gravity with quantum mechanics. We need theories like this to work out what happens when microscopic volumes experience an extreme gravitational force, as happened near the big bang, for example. In the mid 1980s, Ashtekar rewrote the equations of general relativity in a quantum-mechanical framework. Together with theoretical physicists Lee Smolin and Carlo Rovelli, Ashtekar later used this framework to show that the fabric of space-time is woven from loops of gravitational field lines. Zoom out far enough and space appears smooth and unbroken, but a closer look reveals that space comes in indivisible chunks, or quanta, 10-35 square metres in size.

In 2000, Martin Bojowald, then a postdoc with Ashtekar at the Pennsylvania State University in University Park, used loop quantum gravity to create a simple model of the universe. LQC was born.

Bojowald's major realisation was that unlike general relativity, the physics of LQC did not break down at the big bang. Cosmologists dread the singularity because at this point gravity becomes infinite, along with the temperature and density of the universe. As its equations cannot cope with such infinities, this theory fails to describe what happens at the big bang. Bojowald's work showed how to avoid the hated singularity, albeit mathematically. "I was very impressed by it," says Ashtekar, "and still am."

Jerzy Lewandowski of the University of Warsaw in Poland, along with Bojowald, Ashtekar and two more of his postdocs, Kiran Singh and Tomasz Pawłowski, went on to improve on the idea. Singh and Pawłowski developed computer simulations of the universe

pierwszym konkretnym zastosowaniem innej teorii zwanej teorią pętlowej grawitacji kwantowej, która w sprytny sposób łączy teorię grawitacji Einsteina z mechaniką kwantową. Teorie tego typu są potrzebne, aby ustalić, co się dzieje, gdy mikroskopijne objętości poddane zostają działaniu skrajnie wysokiej siły grawitacji, jak miało to miejsce w podcazas Wielkiego Wybuchu. W połowie lat osiemdziesiątych Ashtekar przepisał równania ogólnej względności w kontekście mechaniki kwantowej. Następnie wraz z fizykami teoretykami Lee Smolinem oraz Carlo Rovellim wykorzystał mechanikę kwantową, aby udowodnić, że struktura czasoprzestrzeni zbudowana jest z pętli linii pola grawitacyjnego. Przy dostatecznie dużym oddaleniu przestrzeń wydaje się gładka i ciągła, ale w zbliżeniu okazuje się że składa się ona z niepodzielnych elementów zwanych kwantami, mierzących 10–35 m².

W roku 2000 Martin Bojowald, wówczas asystent Ashtekara na stażu habilitacyjnym na amerykańskim Pennsylvania State University, wykorzystał pętlową grawitację kwantową, aby stworzyć prosty model wszechświata. W ten sposób narodziła się pętlowa kosmologia kwantowa.

Według jednego z najistotniejszych odkryć Bojowalda, w odróżnieniu od ogólnej teorii względności, pętlowa kosmologia kwantowa sprawdza się również w przypadku teorii Wielkiego Wybuchu. Kosmologowie obawiają się osobliwości, ponieważ w tej formie wszechświat charakteryzuje się nieskończoną grawitacją, temperaturą oraz gęstością. Z uwagi na fakt, iż równania ogólnej teorii względności nie są w stanie poradzić sobie z takimi nieskończonymi wartościami, teoria ta nie jest w stanie opisać, co się dzieje podczas Wielkiego Wybuchu. Praca Bojowalda zaprezentowała, jak w matematyczny sposób uniknąć zniechęconego przez kosmologów pojęcia osobliwości. – Byłem pod wielkim wrażeniem – opowiada Ashtekar – i nadal jestem.

Jerzy Lewandowski z Uniwersytetu Warszawskiego wraz z Bojowaldem, Ashtekarem i jego dwoma asystentami na stażu habilitacyjnym, Parampreetem Singhem i Tomaszem Pawłowskim rozpoczęli kontynuację badań nad ulepszeniem tej koncepcji.

according to LQC, and that's when they saw the universe bounce. When they ran time backwards, instead of becoming infinitely dense at the big bang, the universe stopped collapsing and reversed direction. The big bang singularity had truly disappeared.

Singh i Pawłowski opracowali komputerowe symulacje zgodne z pętlową kosmologią kwantową, które to właśnie zademonstrowały zjawisko „odbicia” wszechświata. Kiedy symulacja przebiegała wstecz, wszechświat w momencie Wielkiego Wybuchu zamiast stać się nieskończenie gęsty, przestał się zapadać i zmienił kierunek. Pojęcie osobliwości sformułowane w teorii Wielkiego Wybuchu rzeczywiście przestało istnieć.