



Quarkmaterie und Supercomputer

Die Untersuchung von Materie bei extrem hohen Dichten und Temperaturen

Frithjof Karsch
Helmut Satz

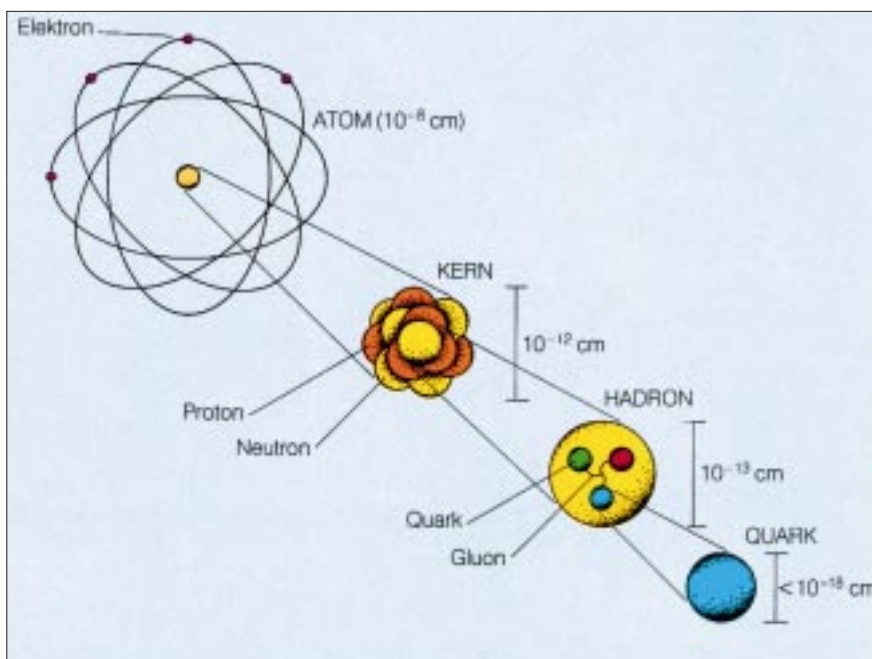
Fakultät für Physik

Was passiert, wenn Materie zu so hohen Dichten komprimiert wird, daß die Kerne von Atomen ineinander gepreßt werden? Was geschieht dann mit den Protonen und Neutronen, aus denen die Kerne aufgebaut sind? An der Universität Bielefeld besteht eines der führenden Zentren für die Untersuchung von Materie unter solchen Bedingungen. Auf Höchstleistungsrechnern wird hier der Stoff erforscht, aus dem das frühe Universum bestand, ganz kurz nach dem Urknall.

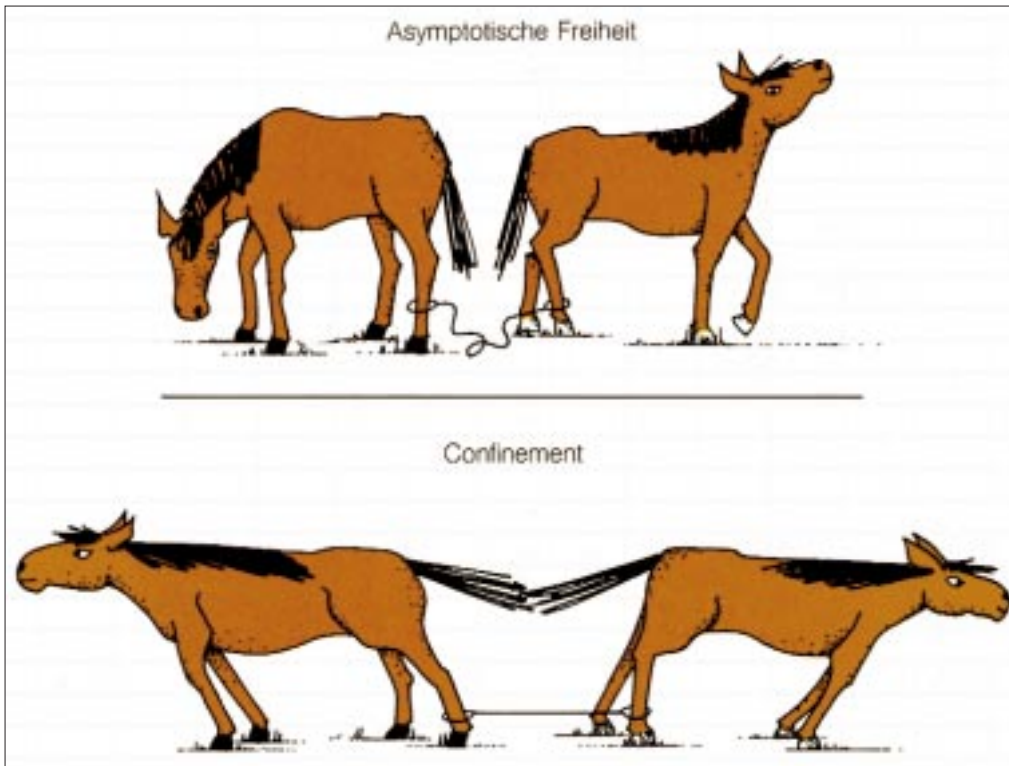
■ Ganz kurz nach dem Urknall

Vor etwa 15 Milliarden Jahren bestand die Welt aus heißer Materie von unvorstellbar hoher Dichte. Das gesamte, heute scheinbar unendliche Universum war damals auf einen Raum von nur wenigen Kubikzentimetern zusammengepreßt. Eine brodelnde Ursubstanz aus Strahlung und den elementaren Bausteinen unserer heutigen Materie – Quarks und Gluonen¹ – begann sich auszudehnen und dabei abzukühlen. Schon nach etwa zehn Millionstel Sekunden war das Universum so weit abgekühlt, daß aus Quarks und Gluonen „Elementarteilchen“ entstanden. So wurden mit Hilfe von Gluonen drei Quarks zu einem Proton oder Neutron gebunden, ein Quark und ein Anti-Quark zu einem Meson (wie z.B. das π -Meson, das häufig beim Zusammenprall von zwei hochenergetischen Protonen erzeugt wird).

Die kleinsten Bausteine des Universums. Materie besteht aus Atomen, wobei nahezu die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern konzentriert ist. Dieser besteht aus Nukleonen (Protonen und Neutronen), die durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten werden. Die Nukleonen ihrerseits sind aus drei Quarks aufgebaut, die durch Gluonen zusammengehalten werden. Weder Quarks noch Gluonen können als isolierte Objekte existieren; es gibt sie nur als Teil eines Ganzen.



¹ Physiker sind recht einfallsreich bei der Benennung neuentdeckter Teilchen. So ist das Quark eine Erfindung des amerikanischen Physikers Murray Gell-Mann, der diesen Begriff dem Roman Finnegans Wake von James Joyce entnommen hat. Das Wort Gluon ist aus dem englischen Wort glue (Klebstoff) abgeleitet.



Die Bindung von zwei Quarks durch Gluonen. Die Art dieser Bindung ist hier durch das Seil dargestellt, das die beiden Pferde aneinanderkoppelt. Stehen sie dicht zusammen, merken sie die Bindung gar nicht (asymptotische Freiheit). Andererseits können sich jedoch nie weit voneinander entfernen (Confinement).

Es dauerte noch weitere zwei bis drei Minuten, ehe sich Protonen und Neutronen zu größeren Klumpen – den Atomkernen – zusammenschlossen, und erst nach mehr als 100 000 Jahren bildeten sich daraus die Atome, indem die Atomkerne Elektronen in ihrem elektromagnetischen Feld einfingen.

Einige Minuten nach dem Urknall, dem *Big Bang*, war das grandiose Ur-Schauspiel somit schon vorbei. Von Quarks und Gluonen war nichts mehr zu sehen, und die meisten kurzlebigen Elementarteilchen waren zerfallen. Protonen, Neutronen und Elektronen bildeten bereits die dominanten „Elementarteilchen“ (Hadronen). Tatsächlich hat es dann lange gedauert, bis Physiker diesen Teilchen, die sie für die kleinsten und unteilbaren Bestandteile der Materie hielten, wieder auf die Spur kamen. Erst Anfang des 20. Jahrhunderts wurde der aus Neutronen und Protonen bestehende Atomkern entdeckt und damit auch die Frage aufgeworfen, was diesen Kern eigentlich zusammenhält. Offenbar mußte es eine starke, anziehende Kraft geben, die in der Lage war zu verhindern, daß sich die elektrisch geladenen Protonen im Kern gegenseitig abstoßen und damit den Bindungszustand von Protonen und Neutronen wieder zerstören. Die dazu notwendige Kraft mußte von ganz neuer, bisher unbekannter Art sein; man nannte sie die *starke Wechselwirkung*.

Erst Mitte der 60er Jahre gelang es dem amerikanischen Physiker Murray Gell-Mann, eine Theorie aufzustellen, die alle bis dahin bekannten Eigenschaften der starken Wechselwirkung korrekt beschrieb. Dazu mußte er allerdings ganz neuartige Grundbausteine einführen, die sich von allen bisher bekannten Teilchen dadurch unterschieden, daß sie nur als Teile

eines Ganzen, nicht aber allein für sich existieren können. Diese Quarks und Gluonen sollen – ähnlich der elektrischen Ladung der Elektronen und Protonen – ebenfalls eine Ladung haben, die Gell-Mann *Farbe* nannte. Der Theorie zufolge gibt es drei verschiedenfarbige Quarktypen (rot, grün, blau) und acht verschiedenfarbige Typen von Gluonen (rot-grün, rot-blau, usw.).

Ähnlich wie die elektrischen Kräfte entgegengesetzt geladener Teilchen, beispielsweise positiv geladene Protonen und negativ geladene Elektronen, zu neutralen Atomen zusammenbinden, so koppelt die starke Wechselwirkung verschiedenfarbige Quarks und Gluonen zu farblosen *Hadronen* zusammen. Gell-Mann nannte seine Theorie *Quantenchromodynamik*; sie führt überraschenderweise zur Vorhersage einer neuen Form der Materie.

■ Eine neue Form der Materie

Die Quantenchromodynamik wurde formuliert, um die Vielzahl der experimentell beobachteten Elementarteilchen und ihre Eigenschaften im Rahmen einer einzigen Theorie zu beschreiben. Tatsächlich war sie dabei äußerst erfolgreich; die Existenz von Hunderten von Elementarteilchen und viele ihrer Eigenschaften konnten auf die Wechselwirkung einiger weniger neuer Bausteine zurückgeführt werden. Es stellte sich jedoch bald heraus, daß die Theorie der Quarks und Gluonen auch ganz unerwartete, neue Phänomene vorhersagt.

Eine dieser unerwarteten Konsequenzen der Quantenchromodynamik ist die Vorhersage einer neuen Erscheinungsform stark wechselwirkender

Materie. Bei den normalerweise zugänglichen Dichten und Temperaturen sind Quarks und Gluonen nicht als freie Teilchen beobachtbar; sie existieren nur in Form von gebundenen Zuständen in den Hadronen. Die Quantenchromodynamik sagt nun vorher, daß sich dies bei sehr hohen Dichten und Temperaturen drastisch ändert: Die Bindungszustände zerfallen dann in ihre Bestandteile, so daß sich Quarks und Gluonen nahezu frei in einem heißen Plasma bewegen können.

Der Grund hierfür ist, daß die Gluonen die Quarks wie mit einem Gummiband verbinden. Versucht ein Quark sich von seinem Partner zu entfernen, steigt die Bindungskraft linear mit dem Abstand der Entfernung. Somit wäre eine unendlich große Energie erforderlich, um die Quarks vollständig voneinander zu trennen; man bezeichnet dies als *Quark Confinement*. Andererseits hat das Gummiband keinen Effekt, wenn die Quarks genügend dicht beieinander sind; es liegt dann sozusagen lose da, und die Quarks spüren nichts von ihrem Partner. Diesen Aspekt nennt man *asymptotische Freiheit*. Quarks und Gluonen werden also nur in einer dichten Menge von anderen Quarks und Gluonen „frei“; allein können sie nie frei auftreten. Dies unterscheidet sie von allen anderen Teilchen, die wir in der Natur kennen. Atome gibt es sowohl als freie Teilchen als auch gebunden in Form von Molekülen. Elektronen und Protonen existieren gebunden in Atomen, Protonen und Neutronen in Kernen, und doch gibt es all diese Elementarteilchen zugleich auch als freie Teilchen.

Andererseits ermöglicht gerade die asymptotische Freiheit die angekündigte neue Zustandsform der Materie. In einem extrem dichten Medium von Quarks und Gluonen ist der mittlere Abstand zwischen zwei Quarks stets so klein, daß die Bindungskräfte immer durch geeignete Partner neutralisiert werden, die Gummibänder also immer locker liegen. Man spricht von einem asymptotisch freien Quark-Gluon-Plasma, in dem sich Quarks und Gluonen „frei“ bewegen können, weil sie in unmittelbarer Nähe stets Partner finden.

Confinement und asymptotische Freiheit sind also verantwortlich dafür, daß Quarks und Gluonen in zwei verschiedenen „Aggregatzuständen“ existieren können: bei niedrigen Dichten und Temperaturen als hadronische Materie, in der jeweils zwei oder drei Quarks durch Gluonen zu farblosen Hadronen gebunden sind, und bei hohen Dichten und Temperaturen als Quark-Gluon-Plasma, in dem sich farbige Konstituenten „frei“ bewegen können.

Die Quantenchromodynamik beschreibt sowohl beide Zustände als auch den Phasenübergang vom

Anzeige

Hadronengas zum Quark-Gluon-Plasma. Wie beim Erwärmen von Eis die Molekülbindungen aufbrechen und bei einer kritischen Temperatur von 0°C ein Phasenübergang zu einer Flüssigkeit aus Wassermolekülen führt, so wird erwartet, daß bei einer wohldefinierten kritischen Temperatur auch die Bindungen zwischen den Quarks aufbrechen (schmelzen) und somit das Hadronengas in ein Quark-Gluon-Plasma übergeht.

Welche Temperaturen sind notwendig, um diesen bisher nie beobachteten Zustand stark wechselwirkender Materie zu erzeugen? Wie lassen sich Vorhersagen über die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas machen? Vor allem aber: Wie ist nachzuweisen, daß dieser Phasenübergang tatsächlich existiert?

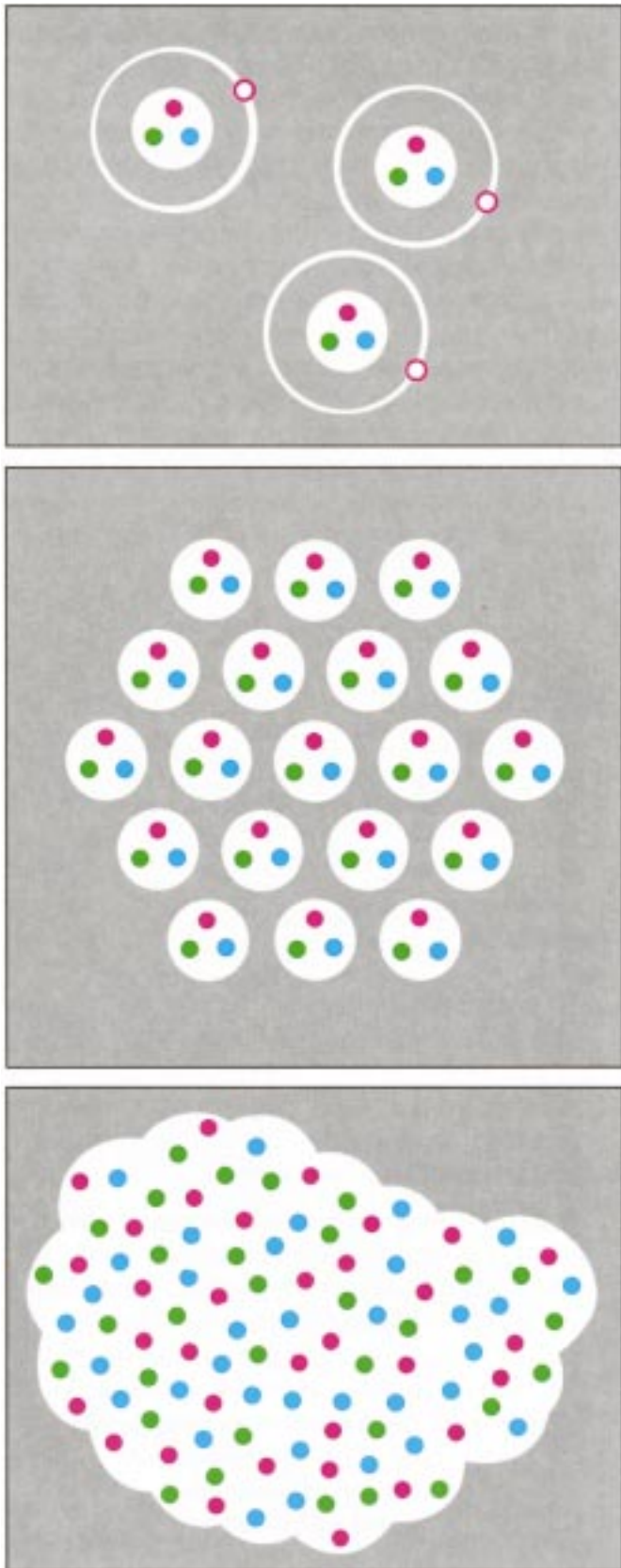
Die Antworten auf all diese Fragen sind prinzipiell durch die Quantenchromodynamik gegeben – vorausgesetzt, man findet eine Methode, die entsprechenden Grundgleichungen zu lösen. Die analytische Mathematik ist bis heute nicht in der Lage, diese Lösung zu liefern, so sehr man es auch versucht hat. Die Rettung kam dann durch den technologischen Fortschritt: Moderne Höchstleistungsrechner ermöglichen die Computer-Simulation der Quantenchromodynamik.

■ Die Computer-Simulation der Quantenchromodynamik

In den siebziger Jahren hatte der amerikanische Physiker Kenneth Wilson eine Formulierung der Quantenchromodynamik gefunden, die für numerische Simulationen auf einem Großrechner besonders geeignet ist. Dazu hatte er das vierdimensionale Kontinuum von Raum und Zeit durch ein Gitter ersetzt und die Quantenchromodynamik als Theorie auf diesem Gitter formuliert. Quarks existieren auf den Schnittpunkten dieses Gitters, Gluonen auf den Verbindungslinien zwischen Gitterpunkten. Die Berechnung einer Theorie mit unendlich vielen Freiheitsgraden im vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum wird so reduziert auf die Untersuchung des Wechselspiels von endlich vielen Variablen auf einem endlichen Gitter – und damit auf ein Problem, das auf einem Computer behandelt werden kann.

Um das Verhalten von Quarks und Gluonen in einem Medium zu untersuchen und etwa zu berechnen, wie sich Druck und Energiedichte mit der Temperatur verändern, müssen möglichst viele Anordnungen von Quarks und Gluonen auf dem Gitter („Konfigurationen“) erzeugt werden, die mit allen Angaben der Theorie verträglich sind. Durch Mittelung über diese verschiedenen detaillierten Zustände erhält man dann die von der Theorie vorhergesagten Werte für die gesuchten thermodynamischen Größen. Die Zahl aller möglichen Konfigurationen von Quarks und Gluonen, die vorgegebenen Bedingungen der Theorie genügen, ist aber viel zu groß, als daß man sie alle untersuchen könnte. Auch existieren Konfigurationen, die zwar allen Anforderungen der Theorie genügen und damit physikalisch zulässig sind, die aber extrem unwahrscheinlich sind – wie etwa eine Anordnung, in der sich alle Teilchen in einer Ecke des gegebenen Raumvolumens befinden. So müssen spezielle numerische Verfahren (Algorithmen, siehe dazu den Kasten auf der rechten Seite) entwickelt werden, die es erlauben, die physikalisch relevanten Konfigurationen zu erzeugen.

Hierbei nutzen die Physiker die Strategie eines Roulette-Spielers in Monte Carlo. Der Spieler will möglichst viel Geld gewinnen. Doch es wäre sicher nicht besonders klug, alles auf eine Zahl zu setzen, die zwar selten erscheint, aber den höchstmöglichen Gewinn bietet. Weitauersinnvoller ist es, den Einsatz so zu verteilen, daß die Gewinnwahrscheinlichkeit pro Spiel größer wird, auch wenn der zu erwartende Gesamtgewinn pro Spiel dabei kleiner ausfallen mag. Wie aus diesem Vergleich ersichtlich, ist es dabei außerordentlich wichtig, möglichst effektive „Spielstrategien“ – die Physiker sprechen von Algorithmen – zu entwickeln. Ein großer Teil der Arbeit in der



Atomare Materie, Kernmaterie und Quarkmaterie. Wird atomare Materie (a) komprimiert, so entsteht zunächst Kernmaterie (b). Wird diese zu noch höherer Dichte komprimiert, dann durchdringen die Nukleonen einander. Die Quarks wissen jetzt effektiv nicht mehr, ob und aus welchen Nukleonen sie gekommen sind – sie finden überall in nächster Nähe viele andere Quarks und sind daher asymptotisch frei. So entsteht Quarkmaterie (c) als neue Zustandsform von dichter Kernmaterie, und im allgemeinen aus hadronischer Materie das Quark-Gluon-Plasma.

Computer-Simulation besteht deshalb in der Entwicklung von Algorithmen, die für das gegebene Problem optimiert sind.

In der Thermodynamik entspricht der Gewinnmaximierung die Minimierung der Energie. Auch hier gilt es, einen Kompromiß zu finden. Einerseits versucht jedes physikalische System einen Zustand minimaler Energie zu erreichen; andererseits ist dies nur ein einziger von vielen möglichen Zuständen, und daher wird es häufiger vorkommen, daß sich ein physikalisches System in einem Zustand aufhält, der zwar eine etwas höhere Energie aufweist, dafür aber durch viele verschiedene Verteilungen der Teilchen in dem System realisiert werden kann. Dies sind dann die physikalisch relevanten Zustände, die eine Berechnung der Vorhersagen der Quantenchromodynamik ermöglichen.

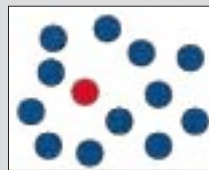
Damit sind die prinzipiellen Grundlagen für die Computer-Simulation gegeben; jetzt braucht man „nur noch“ einen Großrechner, der all die anfallenden Operationen in einer endlichen Rechenzeit durchführen kann. Erste Rechner, die annähernd so etwas leisten konnten, kamen etwa 1980 auf den Markt, und so beginnt auch Anfang der 80er Jahre die Computer-Simulation der Quantenchromodynamik. Da die technologischen Anforderungen bei der Simulation der Quantenchromodynamik größer waren als bei (fast) allen anderen Simulationen, haben sie sich sehr oft bahnbrechend auf die Entwicklung der Computer-Technologie ausgewirkt. So ist heute der leistungsfähigste europäische Großrechner (APE 100) von theoretischen Physikern in Italien zunächst für die Quantenchromodynamik entwickelt und dann zur Produktion an die einschlägige Industrie transferiert worden. An der Weiterentwicklung des APE-Programms für den Bau von dedizierten Quantenchromodynamik-Rechnern sind inzwischen auch Physiker der Universität Bielefeld und des Deutschen Elektronensynchrotrons (DESY) in Hamburg beteiligt. Bei solchen Großrechnern handelt es sich immer um sogenannte Parallelrechner, die aus vielen möglichst effektiv verkoppelten Einzelrechnern bestehen (siehe den Kasten auf Seite 14).

Einer der wichtigsten bisherigen Erfolge in der Simulation der Quantenchromodynamik ist sicher die Feststellung, daß hadronische Materie tatsächlich abrupt in ein Quark-Gluon-Plasma übergeht. Dies ist die Grundlage für die eingangs geschilderte Entstehung der Elementarteilchen im frühen Universum. Schon recht bald oberhalb des Phasenübergangs sind Quarks und Gluonen tatsächlich nahezu frei und kaum noch miteinander in Wechselwirkung. Auch die Temperatur, bei der der Phasenübergang stattfindet,

Simulationsalgorithmen:

Der wohl bekannteste Algorithmus zur Simulation von komplexen Systemen mit vielen Freiheitsgraden ist der **Monte-Carlo-Algorithmus**. Wie schon der Name sagt, spielt bei diesem Simulationsverfahren das Zufallsprinzip eine entscheidende Rolle. Allerdings wird es in sehr kontrollierter Weise eingesetzt: Nach einem wohldefinierten Verfahren wird eine Sequenz von Realisierungen eines vielkomponentigen Systems erzeugt, die gemäß der zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien eine Auswahl charakteristischer Zustandskonfigurationen des Systems darstellt. Diese Sequenz von Zuständen bildet sozusagen einen typischen Satz von Bildern des Systems, die dann benutzt werden können, um an ihnen komplizierte Eigenschaften und Zusammenhänge zu untersuchen.

Monte-Carlo-Algorithmus



Konfiguration A



Konfiguration B

Die Befehlssequenz lautet:

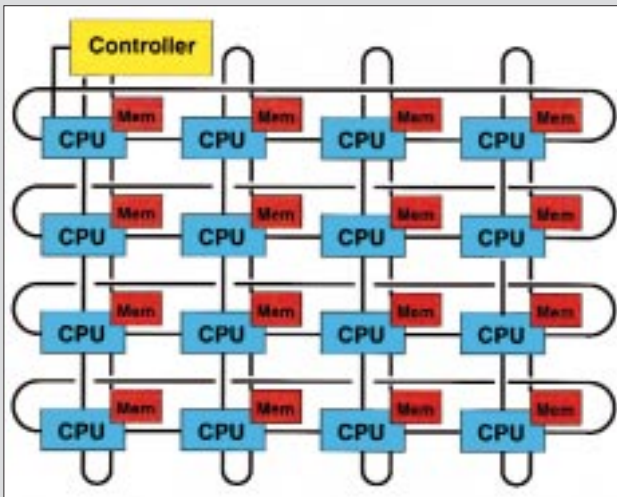
- 1) Ausgehend von einer gegebenen Konfiguration A erzeuge eine neue Konfiguration B, indem die Konfiguration A lokal verändert wird (die rote Kugel wird verschoben).
- 2) Berechne die dadurch entstandene Veränderung der Energie des Systems, $D = E_A - E_B$.
- 3) Ziehe eine **Zufallszahl R** zwischen 0 und 1.
- 4) Ersetze die Konfiguration A durch B, wenn $R < e^D$, ansonsten lasse man die Konfiguration A unverändert.
- 5) Nimm die durch (4) bestimmte Konfiguration in die Sequenz der Konfigurationen auf und gehe dann wieder zu (1).

Der Monte-Carlo-Algorithmus stellt sicher, daß die in dieser Sequenz erzeugten Konfigurationen gemäß der zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien verteilt sind. Dabei werden einerseits Zustände mit möglichst geringer Energie bevorzugt, andererseits werden aber auch energetisch ungünstigere Konfigurationen zugelassen, wenn diese in der Menge aller möglichen Zustände des Systems entsprechend häufiger vertreten sind als die energetisch günstigeren.

det, ist aus Simulationen der Quantenchromodynamik in groben Zügen bekannt. Man erhält einen Wert von ca. $1,7 \cdot 10^{12}$ °K – eine Temperatur, die etwa eine Milliarde mal höher ist als die Temperatur unserer Sonne. Viele weitere Aspekte werden zur Zeit intensiv erforscht – und wesentliche Beiträge werden von der auf diesem Gebiet arbeitenden Forschergruppe in Bielefeld erbracht.

Parallelrechner:

Die Geschwindigkeit üblicher serieller Rechner mit einem Prozessor (CPU) wird durch die Taktfrequenz festgelegt, die die Zahl der Rechenoperationen pro Sekunde bestimmt. So kann ein PC, der mit 300 MHz getaktet ist, 300 Millionen Rechenoperationen pro Sekunde ausführen. Der Erhöhung der Taktfrequenz sind aber natürliche physikalische Grenzen gesetzt. Eine deutliche Erhöhung der Rechenleistung eines Rechners ist daher nur durch die Kombination vieler Prozessoren in einem eng gekoppelten Verbund möglich. Das einfachste Konzept eines derartigen Parallelrechners ist in der Grafik gezeigt. Dabei werden mehrere CPUs, die alle lokal über ihren eigenen Datenspeicher (Mem) verfügen, in der Form eines zweidimensionalen Gitters mit periodischen Rändern verdrahtet. Zu jeder Zeit führen alle Prozessoren dieselben Operationen auf ihren Datensätzen aus oder schicken gemeinsam Daten in einer vorgegebenen Richtung zu einem ihrer Nachbarn. Die Operationen werden durch eine gemeinsame Recheneinheit, den Controller, koordiniert.



Diesen Typ von Parallelrechnern bezeichnet man als SIMD-Rechner (SIMD = Single Instruction Multiple Data). Die Physiker der Theoretischen Physik der Universität Bielefeld betreiben zusammen mit dem Bielefelder Institut für die Simulation komplexer Systeme (ISKOS) eine ganze Reihe von SIMD-Parallelrechnern unterschiedlicher Größe der Firma Quadrics Supercomputer World (QSW). Der größte dieser Rechner besteht aus $8 \times 8 \times 8 = 256$ Recheneinheiten, die zusammen 12,6 Milliarden Rechenoperationen pro Sekunde bewältigen. Die Verdrahtung der Rechner erzeugt eine dreidimensionale Topologie.

■ Die Forschergruppe in Bielefeld

Die Computer-Simulation extrem dichter Materie begann Anfang der achtziger Jahre an drei Zentren: am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA und an den Universitäten Bielefeld und Budapest in Europa. Nicht zuletzt dank der guten Computer-Infrastruktur, zunächst im Land Nordrhein-Westfalen (regionales Rechenzentrum Bochum, Forschungsanlage Jülich) und dann an der Universität selbst, entwickelte sich Bielefeld rasch zum führenden europäischen Zentrum in diesem Gebiet. So koordinierte Bielefeld von 1992 bis 1997 das Netzwerk „Computational Particle Physics“ der Europäischen Union, in dem 20 europäische Universitäten (von Amsterdam bis Zaragoza) zusammenarbeiteten, und Bielefeld wurde von der EU als europäisches „Center of Excellence“ in diesem Gebiet anerkannt. Auch das entsprechende Nachfolgenetzwerk der EU, „Phase Transitions in Hot Matter“, wird wiederum von hier aus koordiniert.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat die Bielefelder Untersuchungen von Anfang an außerordentlich tatkräftig gefördert. In einem DFG-Forschungsschwerpunkt wurde von Bielefeld aus die Arbeit von zehn deutschen Universitäten koordiniert und insbesondere durch den hiesigen, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Höchstleistungsrechner überhaupt erst ermöglicht. Nach Ablauf des Forschungsschwerpunkts im Jahre 1997 haben die Bielefelder Theoretischen Physiker – in diesem Bereich sind das heute die Hochschullehrer Rudolf Baier, Jürgen Engels, Frithjof Karsch, Edwin Laermann, Bengt Petersson und Helmut Satz – die Einrichtung einer DFG-Forschergruppe „Materie bei extremer Dichte“ beantragt; diese wurde im Herbst 1998 bewilligt. Gleichzeitig wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft auch die Anschaffung eines Großrechners der nächsten Generation empfohlen, der etwa fünfmal leistungsfähiger sein wird als der zur Zeit verfügbare und der Ende 1999 den Betrieb aufnehmen soll. Diese beiden Maßnahmen werden es den Bielefelder Physikern ermöglichen, ihre international anerkannte Arbeit in diesem Bereich fortzusetzen und zu erweitern.

Prof. Dr. Frithjof Karsch (rechts) studierte Physik an der Universität Bielefeld, wo er 1982 promovierte. Nach mehrjährigen Forschungsaufenthalten in Genf und Urbana-Champaign (Illinois, USA) ging er 1986 als wissenschaftlicher Mitarbeiter zum Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf. Er wurde 1990 als Professor für Theoretische Physik an die Universität Bielefeld berufen. Von 1990 bis 1993 war er auch Leiter der Elementarteilchenphysikgruppe am Höchstleistungsrechenzentrum (HLRZ) in Jülich. Professor Karsch ist einer der Mitbegründer des Bielefelder Instituts für die Simulation komplexer Systeme (ISKOS), dessen geschäftsführender Leiter er von 1995 bis 1998 war. Derzeit ist er sowohl Koordinator eines europäischen Forschungsverbundes zur Untersuchung von Phasenübergängen in der Teilchenphysik als auch Sprecher einer 1998 gegründeten DFG-Forschergruppe zur Untersuchung von Materie unter extremen Bedingungen in der Theoretischen Physik.

Prof. Dr. Helmut Satz (links) studierte Physik an der Michigan State University (USA) und an der Universität Hamburg, wo er 1963 promovierte und sich 1967 habilitierte. Nach mehrjährigen Forschungsaufenthalten in Los Angeles, Genf und Helsinki wurde er 1971 als Professor für Theoretische Physik an die Universität Bielefeld berufen. Von 1974 bis 1981 gehörte er dem wissenschaftlichen Direktorium des Zentrums für interdisziplinäre Forschung an. Von 1985 bis 1989 war Prof. Satz außerdem Mitarbeiter am Brookhaven National Laboratory in New York, und von 1989 bis 1995 war er von der Universität Bielefeld beurlaubt, um am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf die theoretische Betreuung der dort laufenden Kern-Kern-Experimente zu übernehmen. Professor Satz ist Mitglied der Europäischen Rechnerausschüsse für Kernphysik (NuPECC) und für Elementarteilchenphysik (ECFA), in denen die Planung gemeinsamer europäischer Großrechenanlagen betrieben wird.



Anzeige