

Expedition in das Innere von Neutronensternen

Das „Compressed Baryonic Matter“ (CBM) Experiment an FAIR hat zum Ziel, die Eigenschaften von Kernmaterie bei sehr hohen Dichten, wie sie im Zentrum von Neutronensternen herrschen, zu erforschen. Die Entdeckung des Phasenübergangs, des kritischen Punkts und neuartiger Formen von Kernmaterie würde Antworten auf fundamentale Fragen geben:

- *Warum können Quarks nicht als individuelle Teilchen beobachtet werden, sondern immer nur in Zweier- oder Dreiergruppen?*
- *Warum haben Protonen und Neutronen, die Bausteine der Atomkerne und unseres Universums, eine etwa 50 mal größere Masse als die Summe ihrer elementaren Bestandteile?*
- *Welche Art von Materie existiert im Innern von Neutronensternen?*
- *Gibt es neuartige Formen von Kernmaterie?*

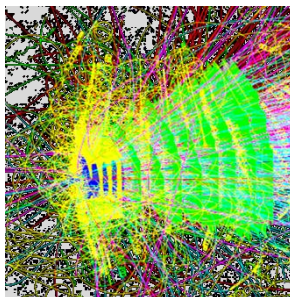


Abb. 4: Simulation einer zentralen Kollision zweier Goldkerne, bei der ein Kern mit einer Energie von 8 GeV pro Nukleon auf einen ruhenden Atomkern trifft. Die Spuren sind das Ergebnis von Rechnungen, die im Rahmen der Entwicklung des Experiments CBM an FAIR durchgeführt werden.

Im Experiment müssen möglichst viele der in einem hochenergetischen Schwerionenstoß neu entstandenen Teilchen gemessen werden. Deren Anzahl, Energie, Masse und Zusammensetzung reflektieren die Temperatur und die Dichte des Feuerballs. Eine besondere Rolle spielen hierbei solche Teilchen, die aus der frühen und dichten Phase des Feuerballs stammen und nur wenig durch die spätere hadronische Phase beeinflusst werden. Dazu gehören besonders Teilchen, die bereits im Inneren des Feuerballs zum Beispiel in Elektron-Positron-Paare oder Müonenpaare zerfallen. Interessant sind auch instabile Teilchen, die aus schweren Quarks bestehen. Viele dieser Teilchen werden zum ersten Mal mit dem CBM-Experiment bei FAIR-Energien gemessen. Eine weitere wichtige Beobachtungsgröße ist das Expansionsverhalten der Materie nach einer Kollision, der sogenannte kollektive Fluss der Teilchen. Ähnlich wie die Hubble-Konstante die Expansion des Universums charakterisiert und damit Rückschlüsse auf den Urknall ermöglicht, erlaubt der kollektive Teilchenfluss Rückschlüsse auf den Zustand der Materie im frühen Feuerball. In Abbildung 4 ist die Simulation einer zentralen Kollision zweier Gold-Kerne bei FAIR-Energien dargestellt.

Das CBM-Experiment bei FAIR

Viele der oben genannten Teilchen, die als Sonden dichter Materie dienen, werden nur sehr selten produziert, manche nur etwa einmal in einer Million Kollisionen. Die experimentelle Herausforderung besteht also darin, möglichst viele Kollisionen in kurzer Zeit zu messen. Das CBM Experiment ist daher so ausgelegt, dass es bis zu 10 Millionen Kollisionen pro Sekunde aufnehmen und untersuchen kann. Dazu wurden eine Reihe sehr schneller Detektoren entwickelt:

- *Acht Ebenen mit insgesamt etwa 1000 doppelseitigen Silizium-Mikrostreifensensoren, die in einem Magnetfeld aufgebaut sind, dienen der Vermessung von bis zu 1000 Teilchenspuren pro Kollision.*
- *Ein Flugzeit-Detektor mit einer aktiven Fläche von 100 m² misst die Geschwindigkeit der Teilchen. Daraus wird, zusammen mit der Krümmung der Teilchenspur im Magnetfeld, die Masse der Teilchen berechnet.*
- *Ein sogenannter Ring Imaging Cherenkov-Detektor und ein Transition Radiation Detektor dienen zur Identifizierung von Elektronen und Positronen.*
- *Zur Messung von Müonen wird ein Detektorsystem aufgebaut, das aus 15 großflächigen Gaszählern und 4 Eisenabsorbem mit einem Gesamtgewicht von 300 Tonnen besteht.*
- *Die Zentralität der Kollision und die Orientierung der Kollisionsebene werden mit einem Kalorimeter bestimmt, das aus Szintillator- und Bleiplatten besteht.*

Ein sehr wichtiger Bestandteil des Experiments ist die Hochgeschwindigkeits-Datenauslese-Elektronik, die eine Datenmenge von bis zu einem Terrabyte pro Sekunde in ein Hochleistungs-Computerzentrum transportiert, wo alle Spuren in Echtzeit rekonstruiert und die Teilchen identifiziert werden.



Mehr als 460 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 54 Institutionen und 11 Ländern haben sich in der CBM Kollaboration zusammengefunden, um das CBM Experiment aufzubauen.

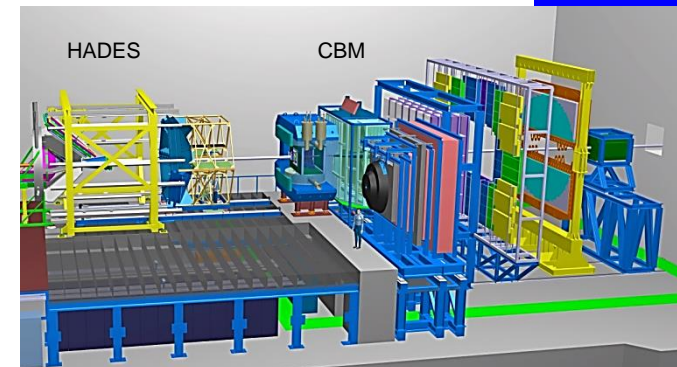


29th CBM Collaboration Meeting, 20-24 März 2017, GSI

Das

Compressed Baryonic Matter

Experiment bei FAIR



<http://www.fair-center.eu/for-users/experiments/cbm.html>

Weltweit werden an den größten Beschleunigeranlagen Experimente mit hochenergetischen Ionenstrahlen durchgeführt, um die Eigenschaften von Kernmaterie bei extrem hohen Dichten und Temperaturen zu untersuchen. Dazu werden zwei schwere Atomkerne auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und dann zur Kollision gebracht. Dabei entsteht für Bruchteile von Sekunden ein hoch komprimierter und heißer Feuerball. Dieser explodiert in Tausende subatomarer Teilchen, von denen die meisten erst in der Kollision entstehen. Bei den höchsten Energien, die am „Relativistic Heavy Ion Collider“ (RHIC) am BNL in USA oder am „Large Hadron Collider“ (LHC) am CERN erreicht werden, besteht der Feuerball aus einer Mischung aus Materie und Antimaterie. Seine Temperatur ist hunderttausend-fach höher ist als die im Zentrum unserer Sonne. Ähnliche Bedingungen herrschten im frühen Universum, etwa eine millionstel Sekunde nach dem Urknall.

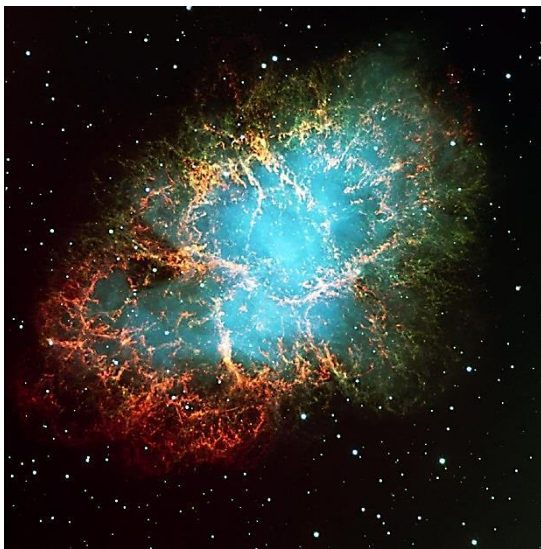


Abb. 1: Der Krebsnebel ist die Asche einer Supernova-Explosion, die im Jahre 1054 von chinesischen Astronomen beobachtet wurde. Die Supernova leuchtete am Himmel so hell wie die Venus für mehr als 20 Tage. Im Jahre 1968 wurde im Zentrum des Krebsnebels eine pulsierende Radioquelle entdeckt, die später als sehr kompaktes stellares Objekt identifiziert wurde. Es war der erste Neutronenstern, der mit einer Supernova in Zusammenhang gebracht wurde.

Bei niedrigeren Energien, wie sie am Super-Protonen-Synchrotron am CERN oder an der zukünftigen „Facility for Antiproton and Ion Research“ (FAIR) in Darmstadt erreicht werden, werden die kollidierenden Atomkerne zu einem Feuerball komprimiert, wobei die bis zu zehnfache Dichte eines normalen Atomkerns erreicht werden kann. Wäre der Feuerball so groß wie ein Stück Würfelzucker, besäße er eine Masse von 3 Milliarden Tonnen. Solche Materiedichten kommen in der Natur nur im Zentrum von Neutronensternen vor, die in katastrophalen kosmischen Ereignissen geboren werden: im Kollaps mit nachfolgender Explosion großer Sterne am Ende ihres Lebens. Der Rest einer solchen Supernova ist der Krebsnebel (siehe Abbildung 1).

Neutronensterne sind die kompaktesten Objekte die man kennt. Sie haben eine Masse von 1,2 - 2 Sonnenmassen und einen Durchmesser von nur 20 - 40 km (zum Vergleich: unsere Sonne hat einen Durchmesser von etwa 1.4 Millionen km). Aufgrund der extrem hohen Dichte im Zentrum von Neutronensternen erwartet man, dass sich die Protonen und Neutronen - die Bausteine der Atomkerne - in ihre elementaren Bestandteile - die Quarks und Gluonen - auflösen. Der schematische Schalenbau und die hypothetische Zusammensetzung eines Neutronensterns sind in Abbildung 2 dargestellt.

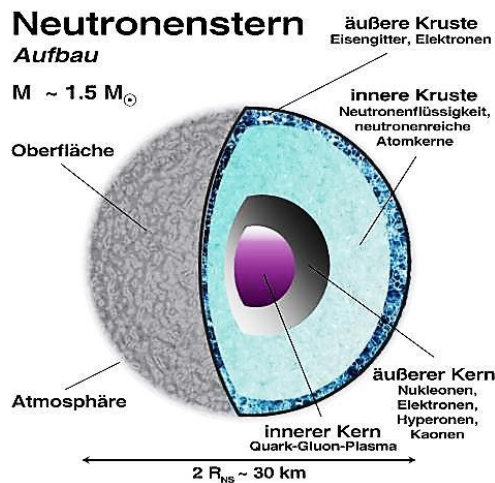


Abb. 2: Schematische Schalenstruktur und Konstituenten eines Neutronensterns.

Kernmaterie kann wie andere Substanzen verschiedene Zustandsformen in Abhängigkeit von Temperatur und Druck annehmen, ähnlich wie Wasser, das je nach Temperatur und Druck flüssig, fest oder gasförmig sein kann. Das theoretisch vorhergesagte Phasendiagramm von Kernmaterie ist in Abbildung 3 skizziert. Aufgetragen ist dort die Temperatur in Einheiten von Millionen Elektronenvolt¹ gegen die Dichte in Einheiten der normalen Atomkerndichte. Für besonders hohe Temperaturen oder Dichten erwartet man, dass sich ein Quark-Gluon-Plasma bildet. Man nimmt heute an, dass dieser Phasenübergang je nach Temperatur und Dichte unterschiedlich abläuft: Bei hohen Dichten und niedrigen Temperaturen bildet sich erst eine gemischte Phase aus Hadronen, Quarks und Gluonen, ähnlich wie Wasser am Siedepunkt in eine Phase aus Tröpfchen und Dampf übergeht. In Analogie zum Wasser wird auch für Kernmaterie ein kritischer Punkt vermutet, in dem besonders große Dichteschwankungen erwartet werden.

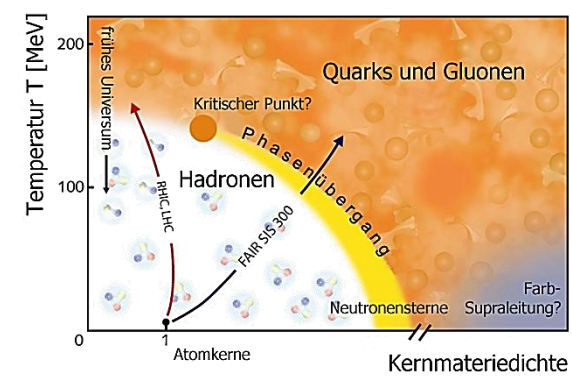


Abb. 3: Schematische Darstellung der Phasen von Kernmaterie für verschiedene Dichten und Temperaturen. Die Pfeile deuten an, welche Bereiche des Phasendiagramms durch Experimente an verschiedenen Beschleunigeranlagen untersucht werden können. Bei FAIR (schwarzer Pfeil) erwartet man, dass man in das Gebiet sehr hoher Dichten vorstößt und den Phasenübergang von normaler Kernmaterie zu Quarkmaterie entdeckt.

Jenseits des kritischen Punktes, bei kleinen Dichten und hohen Temperaturen, gehen die Hadronen kontinuierlich in das Quark-Gluon-Plasma über. Nach unserem heutigen Verständnis war dies die „Ursuppe“, aus der das heiße Universum kurz nach dem Urknall bestand. Heute könnte Quark-Gluon-Materie noch im Zentrum von Neutronensternen existieren, allerdings bei sehr hohen Dichten und vergleichsweise niedrigen Temperaturen.

¹ 100 Millionen Elektronenvolt (eV) entsprechen einer Temperatur von 1,2 Billionen Grad Celsius. Zum Vergleich: im Zentrum unserer Sonne herrscht eine Temperatur von knapp 16 Millionen Grad Celsius