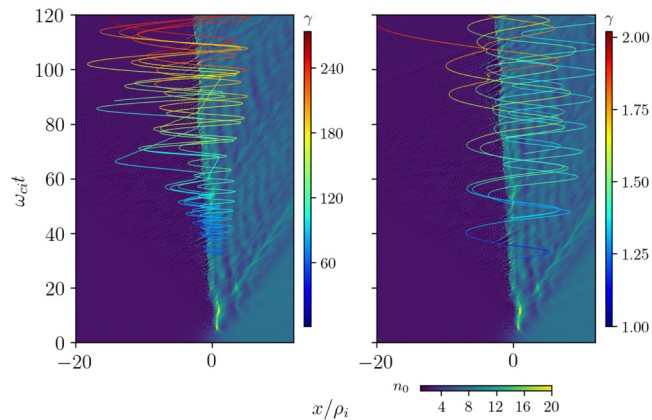


## Fortschrittliche Techniken zur Plasmasimulation

Um zu verstehen, wie Teilchen in astrophysikalischen Systemen beschleunigt werden, sind verschiedene Ansätze erforderlich. Numerische Simulationen spielen hierbei eine immer wichtigere Rolle. Die relevanten Energie- und Längenskalen erstrecken sich jedoch in der Regel über mehrere Größenordnungen, was in numerischen Simulationen nicht leicht zu erfassen ist. Das Problem lässt sich häufig zerlegen, indem man die interessierenden physikalischen Mechanismen isoliert, oder man kann physikalisch motivierte vereinfachende Annahmen treffen, um neue Modelle zu konstruieren. Dies erfordert oft sehr spezifische Werkzeuge und Rechentechniken. Wir nutzen sowohl bestehende Open-Source-Codes als auch neue numerische Verfahren, um bisher unerforschte physikalische Systeme zu untersuchen.



Ausgewählte Flugbahnen von Elektronen (links) und Ionen (rechts), die an einer kollisionsfreien Stoßfront beschleunigt werden. Der Hintergrund zeigt die Dichteprofile, die mit einer Particle-in-Cell-Simulation ermittelt wurden.

Titelbild: Numerische Simulation einer Teilchenwolke, die sich in einem konstanten Magnetfeld entwickelt. Der Code verwendet eine neuartige spektrale Methode zur Erfassung der Geschwindigkeitsraumanisotropie. Der Transport wird mit einem diskontinuierlichen Galerkin-Schema hoher Ordnung gelöst. Die 2D-Oberflächengrafik zeigt die entstehende Dipolanisotropie, wenn sich die Wolke ausdehnt, aber im Magnetfeld rotiert.

Ansprechpartner:

Dr. Brian Reville

Tel.: 06221 516589

E-Mail: [brian.reville@mpi-hd.mpg.de](mailto:brian.reville@mpi-hd.mpg.de)



# Theorie astrophysikalischer Plasmen

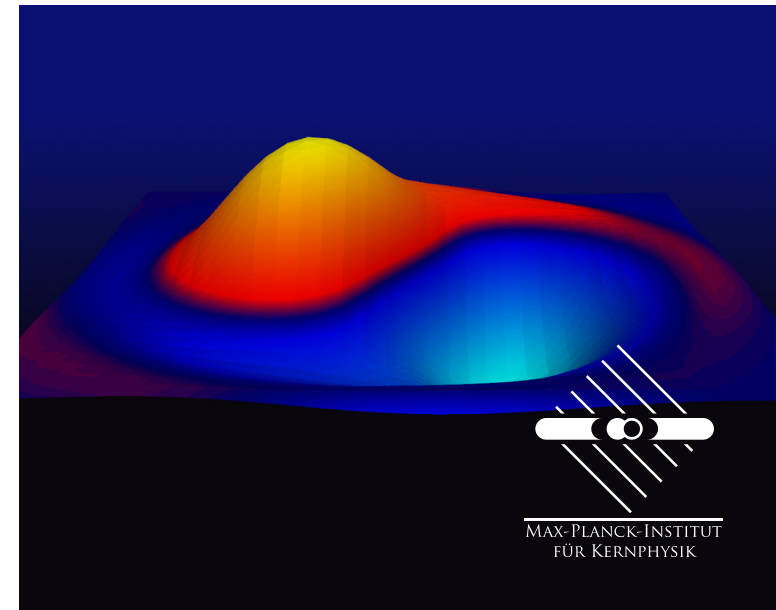


Saupfercheckweg 1  
69117 Heidelberg

[www.mpi-hd.mpg.de](http://www.mpi-hd.mpg.de)



Das Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) ist eines von 86 Instituten und Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft. Das MPIK betreibt experimentelle und theoretische Grundlagenforschung auf den Gebieten der Astroteilchenphysik und der Quantendynamik.

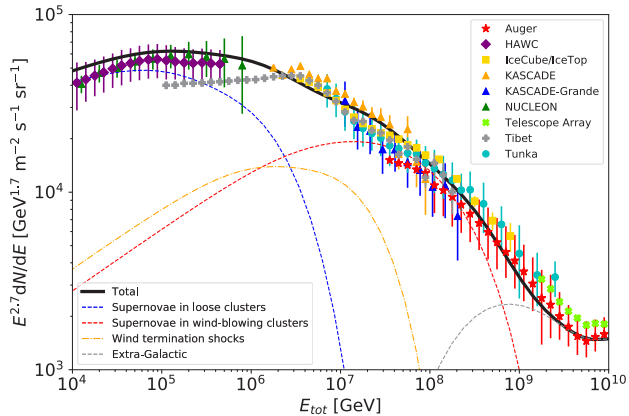


# Theorie astrophysikalischer Plasmen

Im Universum gibt es unzählige Teilchenbeschleuniger, die Elektronen und Kerne extrem beschleunigen. Die energiereichsten Teilchen übertreffen bei weitem das, was in irdischen Experimenten erreichbar ist. Wo und wie erzeugt die Natur solche energiereichen Teilchen? Welche Rolle spielen sie in unserer Galaxis und anderswo? Um solche Fragen zu beantworten, müssen zuverlässige Modelle komplexer astrophysikalischer Systeme entwickelt werden, die sich auf Theorie, Simulationen, Laborexperimente und Beobachtungen stützen.

Unsere Galaxis ist von einer Population energiereicher Teilchen, der kosmischen Strahlung, durchdrungen, die ständig unsere Atmosphäre bombardiert. Seit ihrer Entdeckung vor mehr als einem Jahrhundert haben Experimente ein umfangreiches Wissen über diese kosmische Strahlung angesammelt und entscheidende Details über ihr Energiespektrum und ihre Zusammensetzung enthüllt. Dennoch ist der Ursprung der kosmischen Strahlung sowohl in unserer Galaxis als auch anderswo nach wie vor Gegenstand von Spekulationen.

Obwohl schlüssige Beweise fehlen, besteht weitgehend Einigkeit, dass kosmische Strahlungsteilchen in erster Linie durch sich schnell bewegende Schocks beschleunigt werden, wie sie bei Explosionen am Ende eines Sternenlebens entstehen.

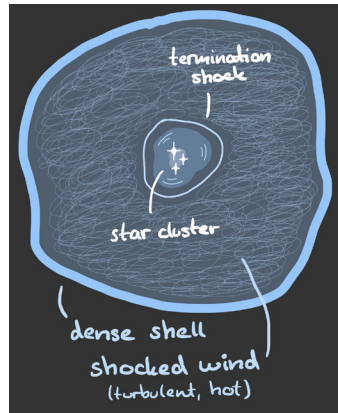


Experimentelle Datenpunkte von Messungen des auf der Erde ankommenden kosmischen Strahlungsflusses, summiert über alle Teilchenarten. Theoretische Kurven, abgeleitet von einem Szenario, bei dem die galaktische kosmische Strahlung hauptsächlich in jungen massereichen Sternhaufen beschleunigt wird.

Um das zu bestätigen, untersuchen wir Details des Beschleunigungsprozesses in verschiedenen Szenarien, Teilchendynamik in und um ihre Quellen, die diesen Prozessen zugrunde liegende Plasmaphysik einschließlich Rückkopplung, und vor allem wie Strahlungssignaturen zu identifizieren wären.

## Supernova-Überreste & massereiche Sternhaufen

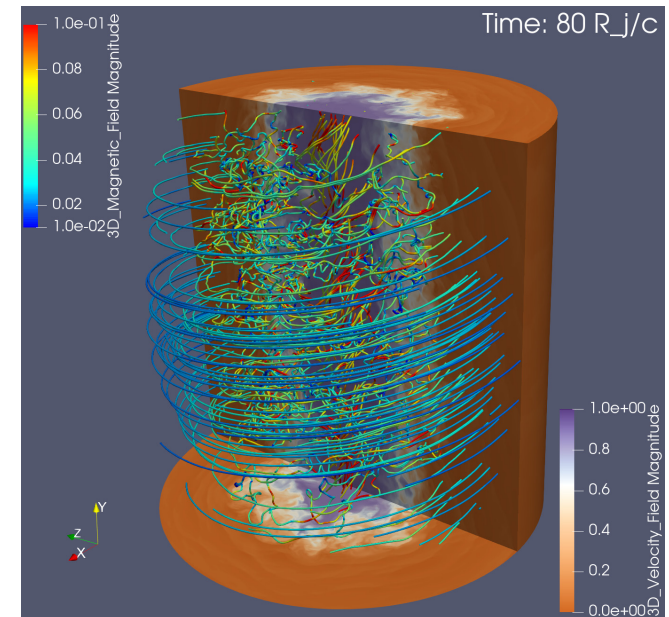
Das Standardmodell der Erzeugung kosmischer Strahlung nimmt an, dass diese hauptsächlich aus den Schocks um Überreste von Supernovaexplosionen stammt. Es ist ungewiss, ob dies alle Beobachtungen erklären kann. Die maximale Energie, die ein Teilchen in diesem Szenario erreicht, könnte von den Umgebungsbedingungen um den Mutterstern abhängen, wobei nur sehr wenige Sterne die notwendigen Voraussetzungen erfüllen, um gemessene Merkmale im lokalen kosmischen Strahlenspektrum zu reproduzieren. Derzeit gibt es keine eindeutige Quelle für die energiereichste galaktische kosmische Strahlung. Eine mögliche Lösung dieses Rätsels sind junge massereiche Sternhaufen, die Kinderstuben massereicher Sterne. Die einzigartigen Bedingungen in deren Umgebung könnten Beschleunigung der kosmischen Strahlung auf extremste Werte begünstigen. Zukünftige Gammastrahlen-Observatorien werden viele solcher Systeme detailliert untersuchen, was, unterstützt durch theoretische Vorhersagen, endlich eine Antwort auf das Problem des Ursprungs der kosmischen Strahlung in der Galaxis geben könnte.



Skizze eines kompakten Sternhaufens, einer Art Superblase. Die Sterne im Kern treiben einen kollektiven Überschallwind, der in einem Schock endet. Dieser befindet sich dort, wo der „Staudruck“ des Windes ein Gleichgewicht mit dem eingeschlossenen, turbulenten, schockgeheizten Wind erreicht. Eine dichte Hülle bildet sich durch Aufsammeln von äußerem Material.

## Extragalaktische Jets & Gammastrahlenblitze

Die auf der Erde entdeckten energiereichsten kosmischen Strahlen müssen nicht aus unserer Galaxis stammen und werden daher nicht in ihr erzeugt. Die plausibelsten Kandidaten dafür sind relativistische Ausströmungen aus den Zentren bestimmter aktiver Galaxien, oder Jets, die Gammastrahlenausbrüche antreiben. Wie es den Teilchen gelingt, die Energie dieser Ströme anzuzapfen, bleibt ungewiss. Schocks oder Instabilitäten in den Jets bieten mögliche Wege, um Teilchen zu beschleunigen, obwohl die maximal erreichbaren Energien umstritten bleiben. Dies ist eine komplexe Herausforderung, bei der sowohl die Mikrophysik, die die Bewegung der einzelnen Teilchen bestimmt, als auch die globalen Größenordnungen, die die physikalischen Grenzen festlegen, zu berücksichtigen sind. Wir verwenden eine Kombination aus numerischen und analytischen Werkzeugen, um diese Probleme anzugehen und Vorhersagen für Teilchenspektren und daraus resultierende Emissionen zu treffen. Wir erforschen die physikalischen Prozesse, die die maximalen Teilchenenergien bestimmen, die in verschiedenen Quellen erreichbar sind.



Die magneto-hydrodynamische Simulation eines zylindrischen Jets zeigt das turbulente Profil der Scherschicht, in der Teilchen beschleunigt werden können.