

Typ 1a Supernovae und Quellen kosmischer Strahlung

Handout zum Hauptseminar

Nikolaus Heners

03. Juli 2009

Die Erforschung der kosmischen Strahlung, der Teilchen, die aus dem All auf die Erde geschossen kommen, wurde zunächst von ihren Pionieren in Heißluftballons, auf dem Jungfrauoch in mehr als 4000m Höhe und auf Ranchen in den USA vorangetrieben. Mit Großanlagen wie dem Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien können heute in internationaler Kollaboration Teilchen bis zu 10^{20} eV detektiert werden.

Man vermutet, dass die Überreste einer Supernovaexplosion (supernova remnants, SNR) Teilchen des intergalaktischen Mediums auf Energien von etwa 10^{15} eV beschleunigen können. Dabei liefert das gängige Modell, der Fermimechanismus, aufgrund der enormen Größe dieser Überreste sehr hohe Teilchenenergien. Dennoch muss man Verlustmechanismen, wie z.B. Synchrotronstrahlung, ab gewissen Energien berücksichtigen. Der Bezug zwischen kosmischer Strahlung und Supernovaexplosionen hat nichts mit dem Typ der Explosionen zu tun; es wurde hier der Typ 1a vorgestellt, da andere Typen bereits in anderen Vorträgen vorgestellt wurden. Im Hauptseminarvortrag ging es um die folgenden Fragen:

- Welche grundlegenden Eigenschaften zeichnen die Teilchen aus, die aus dem All auf die Erde geschossen kommen?
- Wie kann man sich erklären, dass diese Teilchen Energien haben, die man in irdischen Beschleunigern nicht erreichen kann?
- Woher kommen diese Teilchen?
- Welche besondere Eigenschaft zeichnet Typ 1a Supernovae aus? Wie stellt man sich den Explosionsmechanismus vor?

Es muss darauf hingewiesen werden, dass alle diese Fragen Gegenstand der aktuellen Forschung sind.

1 Merkmale der kosmischen Strahlung

Man beobachtet Teilchen mit Energien über 10^{20}eV . Während im GeV-Bereich noch eine Rate von 1000 Teilchen pro Sekunde und Quadratmeter vorliegt, sind die höchstenergetischen Teilchen im Bereich von etwa 10^{20}eV mit 1 Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert äußerst selten. Das Spektrum zeichnet sich durch einige wenige besondere Merkmale aus und gehorcht ansonsten in weiten Teilen einem Potenzgesetz, $dN/dE \approx E^\gamma$. Bei den besonderen Merkmalen handelt es sich um Knicke im Spektrum. An diesen Stellen ändert sich der Exponent γ . Bis zum Knie bei etwa $3 \cdot 10^{15} \text{eV}$ gilt $\gamma \approx -2.7$, danach bis zum zweiten Knie gilt $\gamma \approx -3.1$. Die Lage des zweiten Knies ist dabei noch nicht genau bekannt, es ist jedoch bei etwa $3 \cdot 10^{17} \text{eV}$ zu suchen. Hinter dem zweiten Knie ist dann noch an der Stelle des Knöchels ein erneutes Steilerwerden des Spektrums zu beobachten. Um diese Merkmale herauszustellen, empfiehlt sich eine skalierte Darstellung, bei der der Teilchenfluss mit einer geeigneten Potenz der Energie multipliziert wird. In der Abbildung 1 wurde beispielsweise der Faktor $E^{2.5}$ gewählt [2]. Die Tatsache, dass das Spektrum in weiten Teilen einem Potenzgesetz gehorcht,

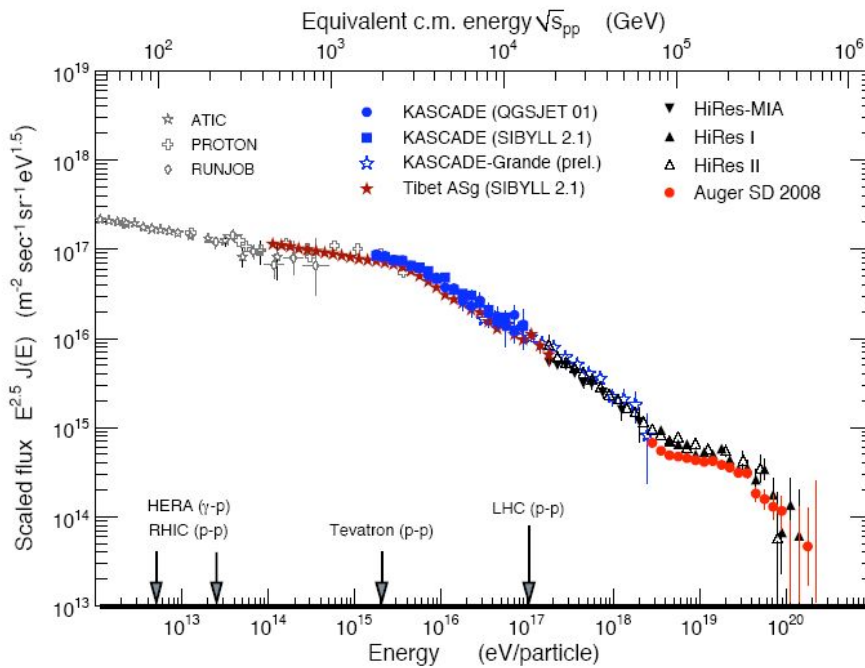


Abbildung 1: Skalierte Auftragung des Energiespektrums der kosmischen Strahlung. In dieser Darstellung sind Merkmale wie das Knie herausgestellt.

lässt darauf schließen, dass die zugrunde liegenden Beschleunigungsmechanismen nicht thermischer Natur sein können. Denn die Spektren solcher Prozesse sind bekannt und

zeichnen sich beispielsweise durch Emissions- oder Absorptionslinien aus.

Von theoretischer Seite aus erwartet man, dass das Spektrum bei etwa $5 * 10^{19} eV$ einen starken Einbruch erleidet, den **GZK-Cutoff**. Teilchen dieser Energie können mit den Photonen der 2.7K-Hintergrundstrahlung besonders effizient wechselwirken, denn es liegt eine sogenannte Delta-Resonanz vor. Man geht davon aus, dass diese Wechselwirkung dafür sorgt, dass Teilchen mit einer Energie über der sogenannten Cutoff-Energie von $5 * 10^{19} eV$ nicht aus einer Entfernung von mehr als 100 Mpc kommen können.

2 Astrophysikalische Quellen kosmischer Strahlung

Wenn man davon ausgeht, dass es sich bei den kosmischen Strahlen um geladene Teilchen handelt, stehen zunächst zwei Beschleunigungsmechanismen zur Verfügung, die auf der Ladung des Teilchens beruhen. Man kann sich einerseits vorstellen, dass das Teilchen der Ladung e durch eine Spannung U eine Energie eU mitgeteilt bekommt. Es sind jedoch nur wenige Quellregionen bekannt, in denen Spannungen erreicht werden, die für sehr hohe Teilchenenergien aufkommen können. Während die von Sonnenfleckenpaaren erzeugten Spannungen Teilchen nur auf Energien im GeV-Bereich beschleunigen können, geht man davon aus, dass in Pulsaren durch die rotierenden Magnetfelder starke elektrische Felder induziert werden können. Unter Umständen erreicht man hier sogar die höchsten beobachteten Energien.

In einem anderen Modell geht man davon aus, dass eine Quellregion vom Radius R vorliegt. In dieser Quellregion können Teilchen beschleunigt werden, wobei ein magnetisches Feld B sicherstellt, dass die Teilchen das Gebiet nicht verlassen. Die Fokussierung der Teilchen auf die Quellregion erfolgt also nach dem Zyklotronprinzip. Ohne etwas über den Beschleunigungsmechanismus ausgesagt zu haben, findet man dann, dass die maximale Energie, die in dieser Anordnung erreicht werden kann, durch

$$E_{Max} = \gamma ecBR = \left(\frac{B}{1G}\right)\left(\frac{R}{1pc}\right) \cdot 10^{20} eV$$

gegeben ist. Denn wenn das Teilchen eine höhere Energie hat, ist das magnetische Feld nicht mehr stark genug, das Teilchen in der Quellregion zurückzuhalten.

In diesem Sinne kann man mögliche Quellregionen analysieren (Hillas 1984, Abbildung 2). Es stellt sich heraus, dass es äußerst schwierig ist, für die Teilchen mit Energien über $10^{18} eV$ (ultra-high energy cosmic rays) mögliche Quellregionen zu finden, selbst wenn man von ultrarelativistischen Quellen ausgeht, $\beta = 1$. Kandidaten sind aktive galaktische Kerne (AGNs), Pulsare, Gamma Ray Bursts (GRB) und Radio Galaxy Lobes.

Nun muss man noch einen Mechanismus postulieren, nach dem eine Beschleunigung in der Quellregion verlaufen kann. Das gängige Modell ist der Fermimechanismus erster Ordnung, der Stöße mit astrophysikalischen Schockfronten, wie sie z.B. bei Supernovaexplosionen auftreten, als Ursache dafür ansieht. Entscheidend ist dabei, dass ein Teilchen sehr viele Male mit einer solche Stoßfront wechselwirken kann. Dabei ist der

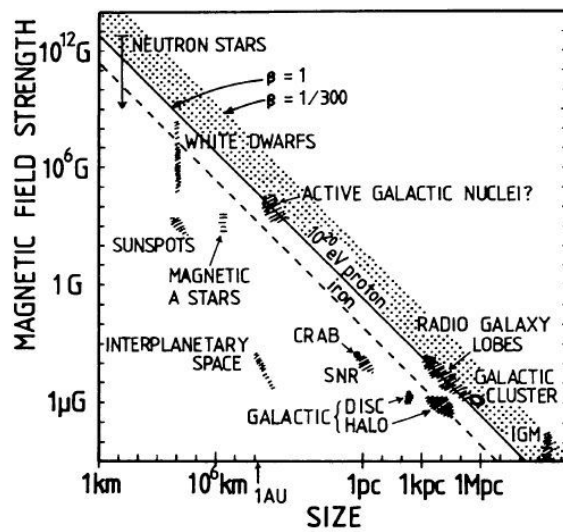


Abbildung 2: Auftragung möglicher Quellregionen nach Hillas. Für Protonen von 10^{20} eV findet man nur wenige Quellen. Dabei ist davon auszugehen, dass sich diese Quellen bereits mit sehr hoher Geschwindigkeit, nämlich fast Lichtgeschwindigkeit, bewegen. Bei Szenarien mit Quellen niedrigerer Geschwindigkeit stellt es sich als äußerst schwierig heraus, Quellregionen für die höchstenergetischen Protonen zu finden.

relative Energiegewinn pro Kollision gegeben durch

$$\epsilon = \frac{4}{3}\beta_{Cl}.$$

In der Präsentation wurde der Weg zu dieser Formel skizziert. Dabei habe ich mich an *T.Stanev: High-Energy Cosmic Rays* gehalten. Dort findet man eine geschlossene Darstellung in schriftlicher Form. Das Hauptargument für den Fermimechanismus besteht darin, dass ein Potenzspektrum vorliegt.

Vor allem bei den Energien wie man sie in Supernova Schockfronten erreichen kann, handelt es sich dabei um einen vielversprechenden Ansatz, der nicht zuletzt durch den Nachweis von TeV-Gammastrahlung in einem Supernovaüberrest (H.E.S.S.) gestützt wird. Bei höheren Energien herrscht jedoch eher noch Spekulation.

Wie in einem Zyklotron treten auch in diesen Quellregionen bei bestimmten Energien Synchrotronverluste auf. Daher vermutet man, dass die maximal verfügbare Energie bei Supernovaexplosionen durch Synchrotronstrahlung auf $10^{14\cdots 15}$ eV begrenzt wird. Es könnte sein, dass das Knie damit zusammenhängt, das heißt, dass der Fluss geladener Teilchen bei 10^{15} eV abnimmt, weil der Beitrag der Supernovae dort verschwindet.

3 Typ 1a Supernovae

Es wird im folgenden ein Modell für Typ 1a Supernovaexplosionen vorgestellt. Dabei habe ich mich vor allem nach dem Buch *T. Montmerle, N.Prantzos: Explodierende Sonnen* gerichtet.

Supernovaexplosionen sind der Menschheit schon lange ein Begriff, denn es handelt sich um Phänomene am Nachthimmel, die der Beobachtung mit dem bloßen Auge zugänglich sind. So wurden „neue Sterne“ bereits von asiatischen und arabischen Hofastronomen berichtet. Eine systematische Analyse dieser Phänomene kann in neuerer Zeit durchgeführt werden, indem man die Energiespektren untersucht. Der Typ 1a, um den es nun geht, zeichnet sich dadurch aus, dass Wasserstoff- und Heliumlinien fehlen. Sehr überraschend, wenn man bedenkt, dass Wasserstoff und Helium die beiden häufigsten Elemente im Universum sind. Es gibt überhaupt nur sehr wenige Objekte, die keinen Wasserstoff aufweisen, und von diesen wenigen kommen eigentlich nur die weißen Zwerge für Kollapsszenarien in Frage. Ferner stellt man bei der Analyse der Leuchtkraft, wie in Abbildung 3 dargestellt, ein charakteristisches Verhalten fest, welches darauf schließen lässt, dass bei einer solchen Explosion ein radioaktives Isotop gebildet wird, genauer gesagt handelt es sich um Nickel 56.

Es stellt sich nun die Frage, wie man Bedingungen erreichen kann, bei denen Nickel 56 gebildet werden kann. Denn im normalen Verlauf der Entwicklung eines Sternes geht die Entwicklung nur bis zu den Eisenelementen. Der Schlüssel dazu liegt in den Eigenschaften des entarteten Elektronengases. Denn während sich ein roter Riese in einem Zustand befindet, in dem die Gesetze der klassischen Mechanik gelten, ist die Dichte bei einem weißen Zwerg bereits so hoch, dass die Quantenmechanik zu Rate gezogen werden muss. Ein weißer Stern kann als Supernova vom Typ 1a explodieren, wenn er sich in einem Doppelsternsystem befindet, sodass die Möglichkeit gegeben ist,

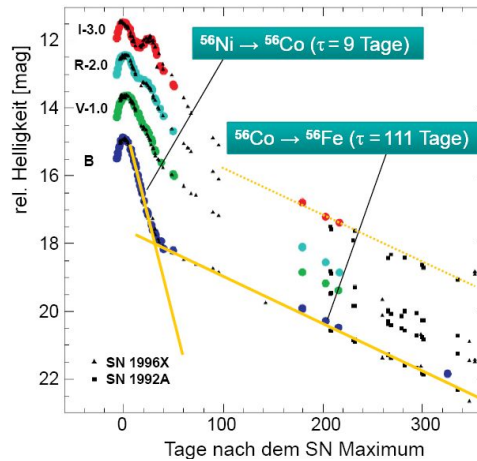


Abbildung 3: Die charakteristische Entwicklung der Leuchtkraft einer Typ Ia Supernova zeichnet sich durch ein sehr intensives Helligkeitsmaximum aus. Nach Erreichen des Maximums ist die Abnahme der Intensität durch die Zerfallsprozesse von Nickel- und Cobaltkernen dominiert.

durch zusätzliche Massenansammlung die Temperatur des entarteten Elektronengases zu erhitzen.

Angenommen, zwei Sterne unterschiedlicher Masse seien gravitativ gekoppelt. Ein solches Doppelsternsystem zeichnet sich durch die Roche-Grenze aus, das ist die Linie, auf der eine Probenmasse von beiden Körpern die gleiche Anziehung erfährt. Solche Systeme sind nicht selten, sondern fast die Hälfte aller Sterne ist gravitativ gekoppelt.

Aus der Sternentwicklung ist bekannt, dass massereichere Sterne früher das Wasserstoffbrennen beenden. Im Doppelsternsystem bezeichnet man den massereicheren Stern auch als Hauptstern. Im Stadium als Roter Riese zeichnet sich der Stern durch eine Abnahme der Temperatur und eine Zunahme des Volumens aus. Allerdings wird bei Überschreiten der Roche-Grenze Materie an den masseärmeren Begleitstern abgegeben, was jedoch die weitere Entwicklung nicht beeinträchtigt. Je nach Anfangsmasse beendet der Hauptstern sein Dasein als kompaktes Objekt (Schwarzes Loch, Weißer Zwerg oder Neutronenstern). Wäre nicht der Begleitstern wäre jetzt das Endstadium erreicht.

Doch der Begleitstern wird auch, wenn auch später, das Wasserstoffbrennen beenden und eine Entwicklung zum Roten Riesen durchlaufen. Dabei kann man sich nun ebenfalls vorstellen, dass der Begleitstern so stark anwächst, dass die Roche-Grenze überschritten wird und somit Materie an das kompakte Objekt, im vorliegenden Fall an einen weißen Zwerg, abgegeben wird.

Damit ist zusätzliche gravitative Energie verbunden. Dabei zeichnet sich das entartete Elektronengas, als das man den weißen Zwerg betrachten kann, durch eine kritische Masse aus, bei der die Gravitationskraft größer als die des Gasdrucks des entarteten

Elektronengases wird. Bei Erreichen dieser Masse, der Chandrasekhar-Masse, tritt das Kohlenstoffbrennen im entarteten Zustand ein. Auf diese Weise können nach und nach alle Brennstoffe gezündet werden, vor allem auch Nickel 56. Das Brennen breitet sich in Form einer Flamme nach außen aus, wobei Asche verbrannten Gases zurückgelassen wird.

Literatur

- 1 M. Hillas: The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1984.22:425-44
- 2 J. Blümer et al., Cosmic Rays from the Knee to the Highest Energies, arXiv:0904.0725v1
- 3 G. Pelletier: Fermi Acceleration of Astroparticles
- 4 G. Drexlin: Skript zur Astroteilchenphysik 2
- 5 W. Hillebrandt, F. Röpke: Supernovae vom Typ 1a, *Sterne und Weltraum* 05/2005
- 6 T. Montmerle, N. Prantzos: Explodierende Sonnen
- 7 T. Stanev: High-Energy Cosmic Rays