



*Astrophysik im  
Gammabereich*

## **Die radioaktive Galaxis**

*Roland Diehl,  
Dieter H. Hartmann*

**Abb. 1:** Das 2002 gestartete Gammateleskop INTEGRAL der Europäischen Weltraumorganisation ist das derzeit leistungsfähigste Gammastrahlen-Observatorium zur Messung von Radioaktivität im Universum (Foto: ESA).

*Aus dem interstellaren Gas unserer Milchstraße dringt eine besondere Art elektromagnetischer Strahlung zu uns: Spektrallinien im Gammalicht, die vom Zerfall radioaktiver Isotope stammen. Radioaktivität im All erhellt die Entstehung neuer Atomkerne und zeigt uns den Himmel in einer ganz anderen Weise als das Licht der Sterne und Galaxien.*

Radioaktivität ist in unserem Alltag gegenwärtig. Sie ist natürlicher Bestandteil der umgebenden Materie und wird zum Beispiel auch in der medizinischen Diagnostik eingesetzt. In jüngerer Vergangenheit haben auch Astronomen gelernt, Strahlung von radioaktiven Zerfällen im Universum mit neuartigen Teleskopen im Gammabereich zu empfangen. Die Analyse dieser Strahlung liefert Aufschlüsse über Ereignisse wie Sternexplosionen (Supernovae) und über die jüngere Entwicklung der Milchstraße.

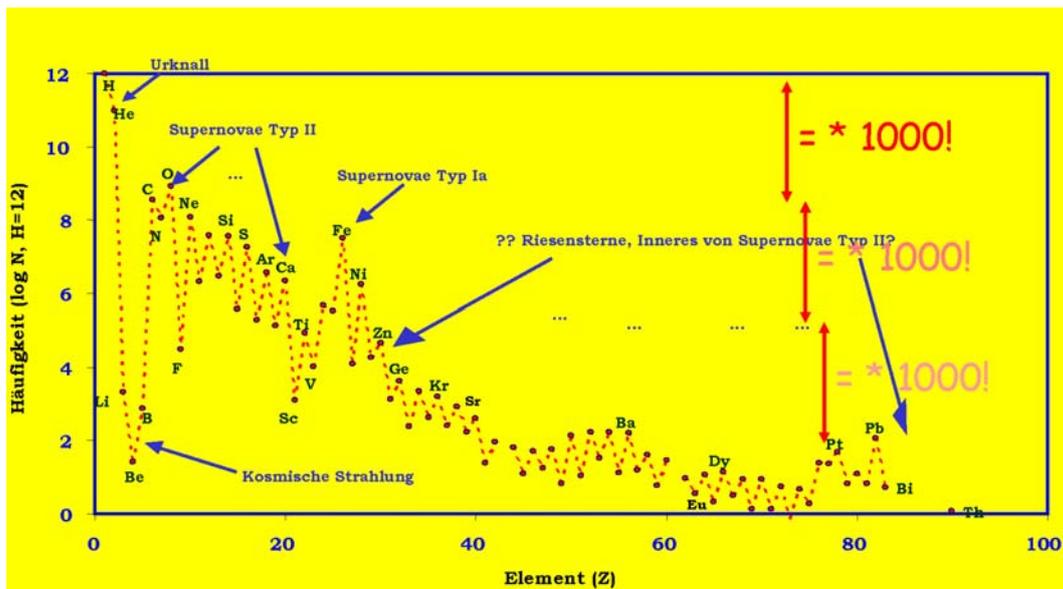
Radioaktive Elemente entstehen zum Beispiel bei Kernfusionsreaktionen im Innern von Sternen und bei Sternexplosionen, also immer dann, wenn Materie sehr heiß und hoch verdichtet ist. Wenn dann Dichte und Temperatur unter die für Fusionsbedingungen notwendigen Werte absinken, zerfallen die instabilen Isotope zu ihren stabilen Endprodukten. Die bei den Zerfällen frei werdende Gammastrahlung durchdringt interstellare Gas- und Staubwolken besser als andere Arten elektromagnetischer Strahlung. Sie wird allerdings von der dichten Erdatmosphäre absorbiert, so dass für ihre Beobachtung Weltraumteleskope nötig sind.

Nukleare Energiezustände sind quantisiert, ähnlich den Zuständen in der Atomhülle. Allerdings ist der Kernaufbau weniger leicht zu durchschauen, da

ein dominantes zentrales Potential fehlt und alle Nukleonen des Kerns (Protonen und Neutronen) mit ihren Impuls- und Spin-Eigenschaften die Quantisierungen gemeinsam bewerkstelligen. Übergänge führen hier aber ebenso wie in der Elektronenhülle zur Emission elektromagnetischer Strahlung ganz scharf definierter Energien. Radioaktiv erzeugte Gammalinien überdecken einen Energiebereich von etwa 70 keV bis 8 MeV.

Astronomie bei MeV-Energien wird durch instrumentellen Hintergrund erschwert, der von der kosmischen Strahlung im Weltall verursacht wird. Zudem lassen sich Photonen mit Energien oberhalb ~200-300 keV nicht mehr durch abbildende Optik sammeln und fokussieren, während andererseits die bei höheren Energien nutzbaren sekundären Teilchenspuren noch schwach und schwer zu verfolgen sind. Die erste Durchmusterung des gesamten Himmels gelang mit dem Compton-Gamma-Ray Observatory der NASA (1991-2000) erstmals im Bereich der Atomkernlinien. Mit „Compton“ wurden eine Empfindlichkeit von  $\sim 10^{-5}$  Photonen pro  $\text{cm}^2$  und Sekunde sowie eine spektrale Auflösung  $E/dE$  von etwa 10 über einen Energiebereich von 0,1 bis 10 MeV erzielt. Mit dieser Empfindlichkeit kann man bisher nur die hellsten Gamma-Linienquellen sehen, und auch dafür benötigt man eine Integrationszeit von mehreren Wochen - Abbildungen wie die in diesem Artikel gezeigten (Abb. 4-6) sind das Resultat jahrelanger Messungen. Deshalb sind unsere bisherigen Erkenntnisse auch beschränkt auf die vergleichsweise nahen Quellen in unserer Galaxis. Das 2002 gestartete Gammateleskop INTEGRAL<sup>1)</sup> (Abbildung 1) der Europäischen Weltraumorganisation, ESA, deckt derzeit mit dem Spektrometer SPI den Energiebereich von 0,02 bis 8 MeV ab [1]. Bei vergleichbarer Empfindlichkeit erreicht INTEGRAL mit dem SPI Instrument bei Gammalinien erstmals relevante Spektroskopie. Mit einer Auflösung  $E/dE \sim 600$  wird dies auf absehbare Zeit das höchstauflösende astronomische Gammastrometer bleiben. Zum Vergleich: Das gesamte Spektrum sichtbaren Lichts erstreckt sich über den bescheidenen Wellenlängenbereich von  $0,4\mu\text{m}$  bis  $0,8\mu\text{m}$ , in dem allerdings schon Fraunhofer im Jahr 1817 mit seinem Teleskop im Sonnenspektrum mehr als 600 Spektrallinien zu unterscheiden in der Lage war. Moderne optische Teleskope erreichen mittlerweile spektrale Auflösungen von  $\sim 100.000$  (z.B. das HDS am Subaru-Teleskop), das aktuelle XMM-Newton Röntgen-Observatorium der ESA mit seinem RGS Spektroskopie-Instrument erreicht 100-500 in seinem Energieband 0.3-2.1 keV.

Radioaktive Isotope eignen sich abhängig von ihrer Halbwertszeit für unterschiedliche Untersuchungen. Mit kurzlebigen Isotopen, deren Zerfallszeiten kürzer sind als die mittlere Rate der sie produzierenden Ereignisse, lassen zum Beispiel sehr gut Sternexplosionen untersuchen. Das betrifft insbesondere die Zerfallskette von  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  (mittlere Zerfallszeit 113 Tage). Isotope mit längerer Lebensdauer, wie  $^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}$  (1,04 Mio. Jahre), akkumulieren sich im interstellaren Raum und spiegeln so eine gemittelte Elemententstehungs-Aktivität über die Zerfallszeit wider. Die Unabhängigkeit der Emission von Dichte- und Temperaturschwankungen bietet eine komplementäre Sichtweise zu den langwelligeren astronomischen



**Abb. 2:** Über 12 Größenordnungen erstreckt sich die Häufigkeit der etwa 110 chemischen Elemente. Sie entstehen über Tausende von meist kurzlebigen Isotopen in Kernreaktionen bei Temperaturen zwischen 15 Millionen Grad (Inneres leichter Sterne wie der Sonne) und einigen Milliarden Grad (Supernova-Explosionen).

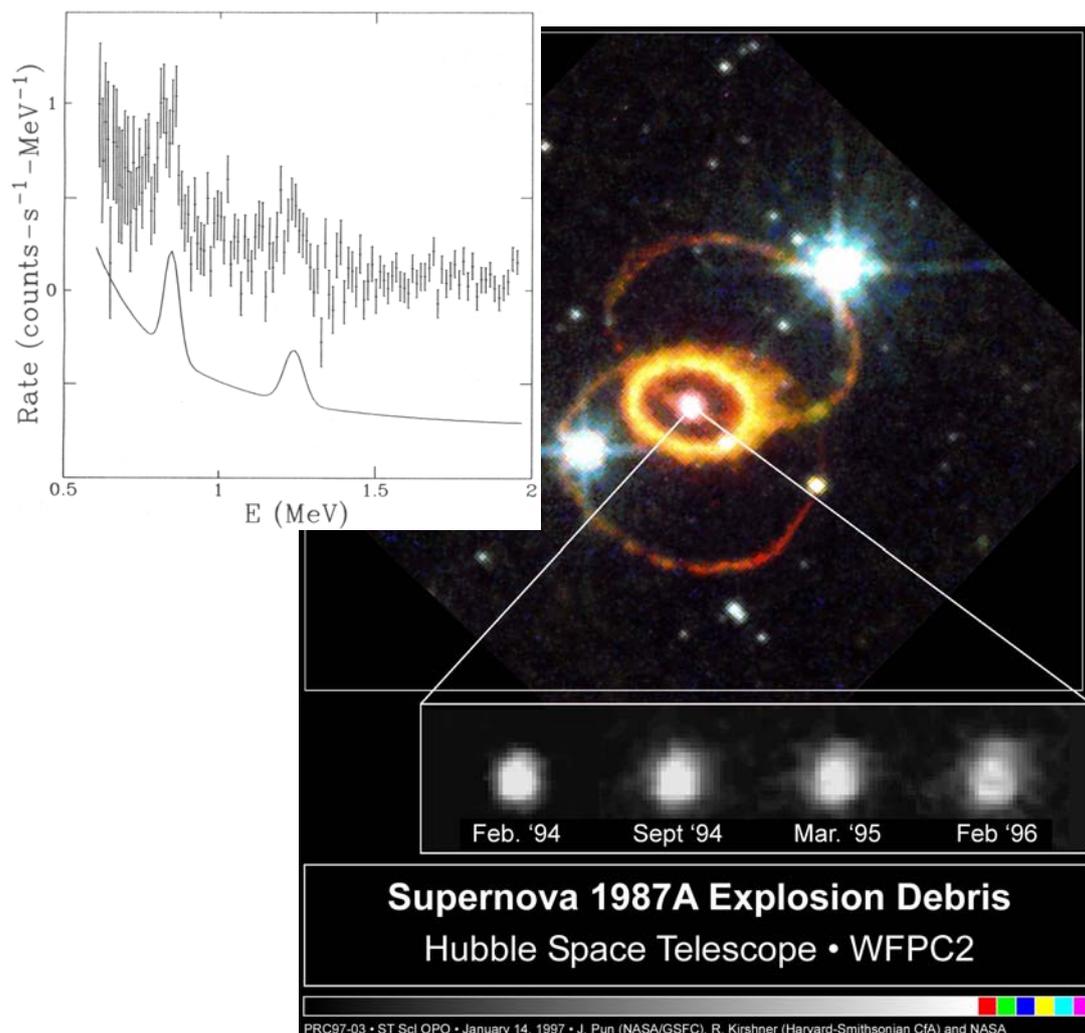
Beobachtungen beispielsweise im Visuellen, bei der es sich meist um thermisch angeregte Strahlung aus Elektronenübergängen der atomaren Hülle handelt.

### Sternexplosionen

Astronomen unterscheiden verschiedene Typen von Supernovae. Eine Supernova vom Typ II ereignet sich, wenn ein massereicher Stern seinen Brennstoff verbraucht hat und in sich zusammenbricht. Hierbei endet der innere Teil des ehemaligen Sterns entweder als Neutronenstern oder Schwarzes Loch, während ein Großteil der äußeren Hülle in den Weltraum abgestoßen wird. Diese expandierende Gashülle ist die hell sichtbare Supernova. Geheizt wird das in ihr enthaltene Gas zum großen Teil durch den radioaktiven Zerfall instabiler Isotope, die bei dem Kollaps entstanden sind.

Eine Supernova Typ Ia ereignet sich dagegen in einem Doppelsternsystem, in dem von dem einen Stern Materie auf den ihn begleitenden Weißen Zwerg hinüberströmt. Wenn der Weiße Zwerg eine kritische Massengrenze (die so genannte Chandrasekhar-Masse von etwa 1.4 Sonnenmassen) überschreitet, zündet im Innern die rasche Fusionsreaktion von Kohlenstoff und der Zwergstern explodiert.

Die Häufigkeiten der hierbei entstehenden Isotope zu ermitteln ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe der modernen Astrophysik. Hierbei mache man sich die enorme Vielfalt der Natur klar: Derzeit sind 3177 Isotope bekannt, davon 308 langlebig oder stabil. Der Häufigkeitsbereich erstreckt sich über 12 Zehnerpotenzen. Ohne diese kosmische Produktion von schweren Elementen wie Sauerstoff, Silizium oder Eisen gäbe es keine feste Materie im Universum, also auch kein Leben. Die Vielfalt der chemischen Elemente (Abbildung 2) und Isotope ist Ergebnis der unzähligen Sternengenerationen seit den Anfängen



**Abb. 3:** Die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke. Die Entdeckung der Gammalinien bei 847 und 1238 keV mit dem SMM Satelliten (eingefügtes Gamma-Spektrum oben links) beweist den Zerfall von  $^{56}\text{Co}$ , und damit die Synthese radioaktiven Materials in der Supernova. Das optische Bild (HST/ESO) ist dominiert von den ringförmigen Emissionen circumstellaren Materials, das durch die Explosionswelle zum Leuchten angeregt wird. Im Innern ist die sich langsam ausdehnende Emission des eigentlichen Supernova-Materials auch in der optischen Emission zu sehen, aus der die Gammalinien im Herbst 1987 (ca. 6 Monate nach der Explosion) erkannt wurden.

des Universums und der explosiven Freisetzung dort entstandener Kernfusionsprodukte. Mit astronomischen Messungen der erzeugten Isotope versuchen wir, die chemische Evolution des Kosmos zu verstehen[2].

Bei einer Supernova sieht man im optischen Bereich lediglich die umgewandelte thermische Strahlung der äußeren, für Strahlung transparenten Hülle. Die rasche Expansion mit Geschwindigkeiten von mehr als 10 000 km/s hat jedoch zur Folge, dass die äußeren Bereiche immer ausgedünnter werden und man im Laufe der Zeit immer tiefer in die Supernova hineinschauen kann. Bis man zum Kernbereich vordringt, können aber viele Monate (je nach Strahlungsart) vergehen. Immer wenn das empfangene Licht nicht zu viele Streuprozesse in der Hülle hinter sich hat, kann wertvolle Information über seinen Entstehungsort gewonnen werden.

Die große Durchdringungsfähigkeit von Gammastrahlung bietet hier einen entscheidenden Vorteil, der die großen Unsicherheiten komplexer Strahlungstransportprozesse in einer rasch und ungleichmäßig expandierenden Hülle umgeht. Die radioaktiven Zerfallslinien im Gammabereich zeigen Ort und Intensität unmittelbar nach ihrer Entstehung an: Die Gammastrahlenquelle befindet sich dort, wo die Isotope der Elementgruppen Eisen-Nickel-Cobalt frisch synthetisiert wurden, und dies ist genau der innerste Teil der Explosion, der die höchsten Temperaturen und Dichten bei der Kernfusion durchlaufen hat.

Mit Computersimulationen lassen sich die Vorgänge im Innern der Supernovae nur schwer erfassen. Während die Fusionsvorgänge im Innern eines massereichen Sterns über mehrere Millionen Jahre hinweg ablaufen und seinen chemischen und isotopischen Aufbau verändern, dauern die physikalischen Prozesse, die die Explosion verursachen, nur wenige Sekunden. Die relevanten Raumdimensionen übersteigen die Größe unseres Planeten, die eigentlichen Kernbrennzonen sind aber nur einige Zentimeter dünn und von ungeheurer Dynamik. Diese riesige Spannbreite der zu berechnenden Skalenbereiche erfordert Näherungsverfahren und Zusatzannahmen. So beschränkt man sich in der kernphysikalischen Reaktionsvielfalt auf eine vereinfachte Materiezusammensetzung aus den elementaren Neutronen, Protonen und nur wenigen Schlüsselisotopen, außerdem stellt man das für die Brennzonenentwicklung entscheidende Turbulenzverhalten des stellaren Gases auf kleinen Skalen mit einem empirischen Skalierungsansatz dar.

Solche Näherungen in numerischen Simulationen lassen sich auf ihre Plausibilität hin überprüfen. Aber die Beobachtungsgrößen einer Supernova, wie ihre Explosionsenergie, Leuchtkraft, chemische Zusammensetzung der Explosionsasche und ihre Kinematik, bilden die eigentlichen Prüfsteine der Modelle. Radioaktiver Zerfall des in großen Mengen erzeugten  $^{56}\text{Ni}$  und die Messung der Gammasppektren in ihrer Entwicklung erlaubt solche Konsistenztests.

Leider sind die derzeitigen Instrumente der Gammaskopie längst nicht so leistungsfähig wie Teleskope in anderen Spektralbereichen. Linienspektroskopie ist bei Supernova vom Typ Ia bis in Entfernungen von 10 bis 50 Millionen Lichtjahren möglich. Das umfasst immerhin ein paar große Sternsysteme, wie die Andromeda-Galaxie oder die nächsten Galaxien des Virgo-Haufens. Eine Supernova vom Typ II müsste sich sogar in unserer eigenen Galaxis oder einer unmittelbaren Nachbargalaxie befinden, damit wir sie noch spektroskopieren können. Im Jahr 1987 ereignete sich in der 150 000 Lichtjahre entfernten Großen Magellanschen Wolke eine Supernova Typ II (Abbildung 3). Bei ihr konnten Gammalinien des radioaktiven Zerfalls von  $^{56}\text{Co}$  und  $^{57}\text{Co}$  gemessen werden. Dies markierte den ersten direkten Nachweis, dass die Supernova-Leuchtkraft radioaktiv verursacht ist. Der Betrieb von INTEGRAL wurde im vergangenen Jahr auch wegen der Aussicht auf solche einzigartigen Beobachtungen von Supernovae bis mindestens 2012 verlängert. Da in unserer Galaxis etwa alle 50 Jahre eine Supernova

explodiert, könnten wir Glück haben und sogar eine galaktische Supernova messen.

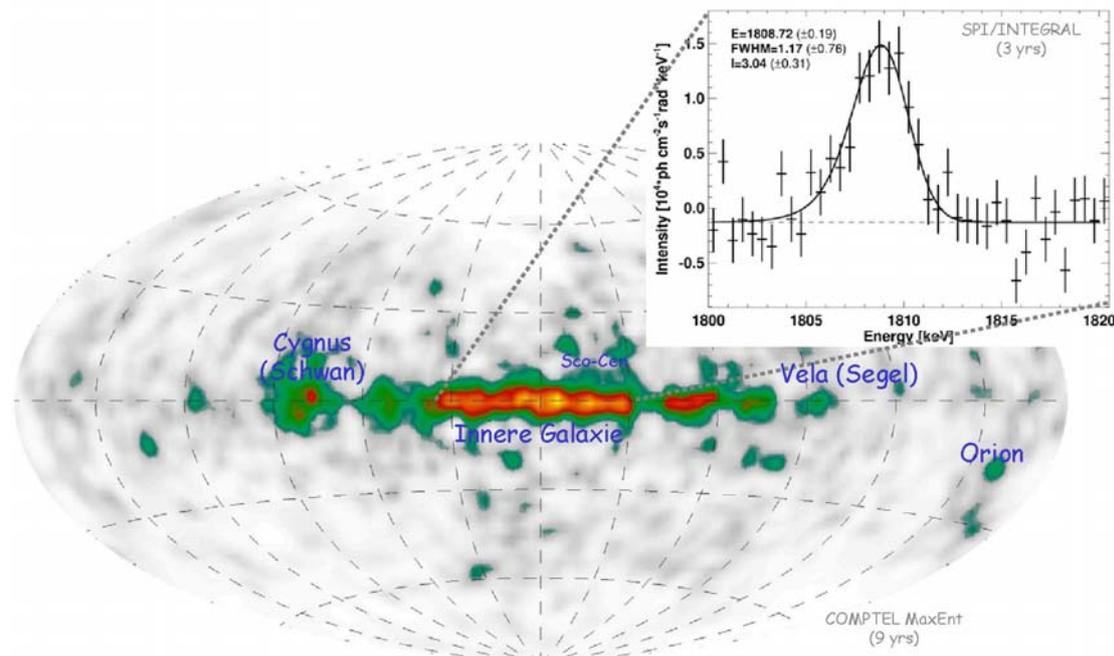
Bereits 1994 gelang es mit dem Compton-Observatorium in der Explosionswolke der Supernova Cassiopeia A (Cas A) Gamma-Emissionslinien des langsamer zerfallenden Isotops  $^{44}\text{Ti}$  (mittlere Zerfallszeit 85 Jahre) bei 1,157 MeV zu messen. Cas A ist etwa 10 000 Lichtjahre entfernt, die Explosion muss sich um 1667 ereignet haben, es gibt allerdings außer einer kurzen Notiz keine nützlichen historischen Aufzeichnungen darüber.

Das Isotop  $^{44}\text{Ti}$  zerfällt in  $^{44}\text{Sc}$  und weiter in  $^{44}\text{Ca}$ . Auch die hierbei entstehenden Emissionslinien bei 68 und 78 keV Energie konnten mit mehreren anderen Instrumenten gemessen werden [3]. Erstaunlicherweise ist Cas A das einzige Objekt, bei dem  $^{44}\text{Ti}$ -Emission nachgewiesen wurde, obwohl insbesondere in den Spiralarmlen der Milchstraße, wo Supernova bevorzugt explodieren sollten, mit Compton und INTEGRAL intensiv gesucht wurde. Dies deutet auf eine Verständnislücke bei Supernovae hin. Entsteht dieses Radioisotop nur bei manchen Supernovae, und wenn ja, warum [4]?

Einen Schlüssel zu dieser Frage kann der  $^{44}\text{Ti}$ -Zerfall vielleicht selbst liefern. Nach heutigen Modellen entsteht dieses Isotop ganz im Inneren der Supernova, nahe an dem von der Explosion übrig bleibenden Neutronenstern. Hier sollte auch die Expansionsgeschwindigkeit des Gases erheblich geringer sein als in der weiter außen befindlichen Hüllenregionen. Geschwindigkeiten von einigen 100 km/s bis maximal wenige 1000 km/s werden erwartet.

Diese Modellvorstellungen sind noch recht schematisch, die atomaren Elementverteilungen mancher Supernova-Überreste scheinen ihr zu widersprechen, aber jüngere Beobachtungen mit INTEGRAL scheinen sie zu bestätigen. Mit dessen Gammaskopiergerät wurden jüngst bei Cas A andeutungsweise alle drei Linien des  $^{44}\text{Ti}$ -Zerfalls erkannt. Die Spektren deuten auf eine Expansionsgeschwindigkeit des  $^{44}\text{Ti}$  von ca. 430 ( $\pm 240$ ) km/s hin – vergleichsweise wenig im Vergleich zu den rund 10 000 km/s der äußeren Supernova-Hülle. Die Auswertung der Spektren ist noch nicht abgeschlossen, und die Doppler-Verschiebung und -Verbreiterung der Zerfallslinien sollten die Kinematik der inneren Supernova-Regionen direkt messbar widerspiegeln – ein entscheidender Parameter in den Explosionsmodellen.

Doch gleichzeitig wirft eine andere Cas A Messung neue Fragen auf. So hat man nämlich bei der atomaren Linie von Eisen wesentlich höhere Geschwindigkeiten mit mehr als 7000 km/s gefunden. Nach den Modellen sollte die Eisenemission aber auch aus der inneren Supernovaregion stammen und dementsprechend geringe Geschwindigkeiten besitzen. Eine asymmetrische Explosion könnte vielleicht hierfür verantwortlich sein. Dennoch zeigt auch diese Messung, wie begrenzt unser Wissen über diese Explosionen noch ist.



**Abb. 4:** Die Milchstraße im radioaktiven Leuchten des Isotops  $^{26}\text{Al}$  (Zerfallszeit  $\sim 1$  Million Jahre). Dies spiegelt die derzeitige Nukleosynthese-Aktivität in unserer Galaxis wider, also die Orte kurzlebiger, massereicher Sterne und ihrer Supernovae.

### Radioaktivität im interstellaren Raum

Supernovae sind nicht die einzigen Objekte, die schwere Elemente und Isotope ins interstellare Medium einbringen. Bei massereichen Sternen gelangen durch Konvektion schwere Elemente aus dem Kernbereich in die äußeren Regionen und die Atmosphäre, von wo aus sie dann über einen starken Teilchenwind ins interstellare Medium gelangen. Langlebige radioaktive Isotope, die in solchen massereichen Sternen fusioniert werden, sind die Gammastrahlen-Emitter  $^{26}\text{Al}$  und  $^{60}\text{Fe}$ .

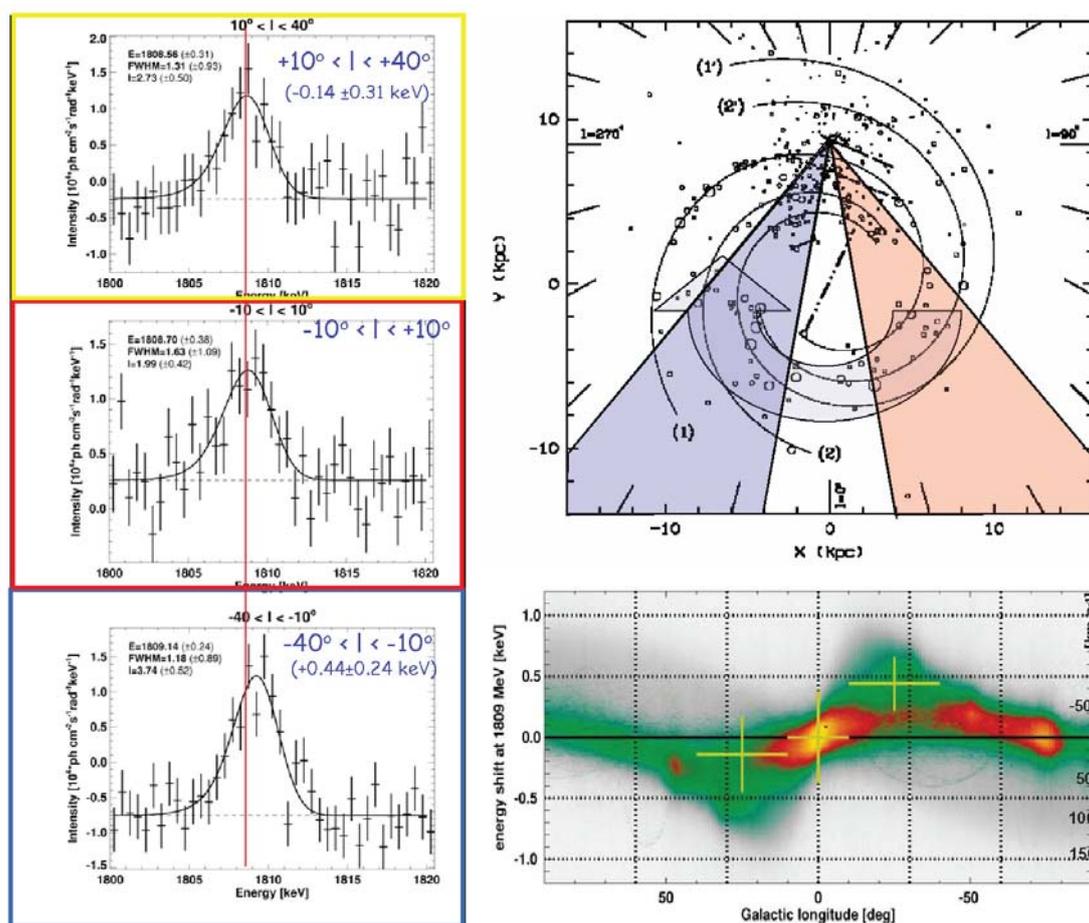
Mit mittleren Zerfallszeiten von einer beziehungsweise zwei Millionen Jahren zerfallen diese Isotope im interstellaren Raum zwischen den sie erzeugenden Sternpopulationen. Im interstellaren Raum sammeln sich daher innerhalb eines Zeitraums von Millionen von Jahren Nukleosyntheseprodukte verschiedener Einzelobjekte an. Radioaktive Gammastrahlung von  $^{26}\text{Al}$  und  $^{60}\text{Fe}$  spiegelt demnach die Aktivität einer ganzen Sterngruppe wider. Wenige Millionen Jahre sind nur ein Wimpernschlag angesichts der Entwicklungszeiten der Galaxis von rund 12 Milliarden Jahren oder auch zur typischen Umlaufperiode um das Zentrum der Milchstraße von 200 Millionen Jahren. Diese Radioaktivität zeigt deshalb eine Momentaufnahme der Galaxis und ihrer derzeit aktiven Regionen. Im Gegensatz dazu dauern Phänomene wie Supernovae und das Nachleuchten ihrer Überreste lediglich einige Jahre beziehungsweise rund 10 000 Jahre. Radioaktivität von  $^{26}\text{Al}$  kann so eine astronomische Zeitlücke abdecken.

Schon mit dem Compton-Observatorium hatte man bei Himmelsaufnahmen Emission im Energiebereich des  $^{26}\text{Al}$ -Zerfalls (1,81 MeV) gefunden. Diese erstreckte sich entlang der gesamten galaktischen Ebene (Abbildung 4). Die

leuchtenden Regionen passen gut zur Vorstellung, dass massereiche Sterne in den Spiralarmen der Galaxis in Gruppen gebildet werden und dort ihre Umgebung mit ihren Fusionsprodukten anreichern.

Mit dem Spektrometer SPI auf INTEGRAL konnte nun auch die Dopplerverschiebung der Gammalinie gemessen werden (Abbildung 5). Sie passt zu den Modellen der Rotation der Milchstraße – ein Beleg dafür, dass die beobachtete  $^{26}\text{Al}$ -Emission großräumig aus der gesamten Galaxis zu uns dringt. Massereiche Sterne sind im optischen Spektralbereich oft schwer beobachtbar, weil dichte Staubwolken sie verbergen. Deshalb stellt die Messung der gesamten galaktischen  $^{26}\text{Al}$ -Emission auch eine repräsentative Messung der Gesamtheit der massereichen Sterne in unserer Galaxis dar, die mit anderen indirekteren astronomischen Messungen verglichen werden kann [5].

Die gesamte Menge des leuchtenden  $^{26}\text{Al}$  ließ sich zu etwa drei Sonnenmassen bestimmen. Berücksichtigt man nun die bekannte



**Abb. 5:** Spektrallinie des  $^{26}\text{Al}$ -Zerfalls, entlang unterschiedlicher Sichtlinien in unserer Galaxis (drei fächerförmige Bereiche wie in Abb. rechts oben gezeigt). Die großräumige Rotation der Milchstraßenebene (Pfeil in Abb. rechts oben) führt zu Relativbewegungen von etwa  $100 \text{ km s}^{-1}$  zwischen dem interstellaren Gas und dem darin enthaltenen  $^{26}\text{Al}$  und dem Sonnensystem. Dies äußert sich in Dopplerverschiebungen der Linien (linke Spalte). Die gesamte Dopplerverschiebung in Abhängigkeit von der galaktischen Längenkoordinate (rechts unten) lässt sich gut mit einem Rotationsmodell der Milchstraße beschreiben (farbig dargestellt).

Häufigkeitsverteilung massereicher Sterne und die aus Modellrechnungen erhaltenen  $^{26}\text{Al}$ -Fusionsmengen pro Stern, so lässt sich abschätzen, wie oft solche massereichen Sterne als Supernovae explodieren. Demnach geschieht dies in unserer Galaxis rund alle 50 Jahre. Dieser Wert passt sehr gut zu bisherigen Abschätzungen.

Mittlerweile konnte INTEGRAL auch das Isotop  $^{60}\text{Fe}$  ( $^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$ ) anhand seiner beiden Gammalinien nachweisen. Da  $^{26}\text{Al}$  und  $^{60}\text{Fe}$  in den gleichen Objekten, allerdings in unterschiedlichen Sternentwicklungsphasen erzeugt werden, ist das relative Verhältnis der von diesen massereichen Sternen ausgestoßenen Mengen ein guter Test unserer Modellvorstellungen von den komplexen Kernfusionsvorgängen. Die Vergleiche stimmen optimistisch, auch wenn zwischenzeitlich irritierende Diskrepanzen zwischen Beobachtung und Theorie auftraten. Diese konnten erst durch genauere kernphysikalische Messungen der beteiligten Isotope und weitere astronomische Beobachtungen ausgeräumt werden. Hier zeigt sich ein fruchtbarer Austausch zwischen Astro- und Kernphysik.

Interessant ist, dass in Meereskrusten des Pazifischen Ozeans ebenfalls Reste von  $^{60}\text{Fe}$  nachgewiesen wurden. Dessen Ursprung wird in einer nahegelegenen Supernova gesehen, bei deren Explosion vor 2-3 Millionen Jahren die Fusionsprodukte ausgestoßen wurden und auch über die Erdatmosphäre ins Meer gelangten. So, wie dieses terrestrische  $^{60}\text{Fe}$  den Einfluss nahegelegener Sterngruppen widerspiegelt, so wird über interstellare  $^{26}\text{Al}$ -Radioaktivität derzeit in den Gammasignalen von INTEGRAL nach regionalen Besonderheiten gesucht, die mit nahen oder besonders herausstechenden Sterngruppen in Verbindung stehen könnten. Die Regionen Cygnus, Orion, und Scorpius-Centaurus sind Gegenstand aktueller Studien (vgl. Abbildung 4). Die Sterne der Cygnus-Region sind so jung, dass  $^{26}\text{Al}$ -Freisetzung hier überwiegend Sternwinden zuzuordnen ist, die Supernova-Explosionen stehen uns noch bevor. Bei Orion haben frühere Sterngenerationen einen markanten interstellaren Hohlraum erzeugt, in den derzeitige Sterngenerationen ihre Radioaktivität strömen lassen. Die Sterngenerationen der Scorpius-Centaurus Sterngruppe befinden sich in der unmittelbaren Sonnenumgebung – deren Supernovae der vergangenen Millionen Jahre sind vermutlich die Ursache der mehrere Lichtjahre großen „lokalen Blase“ ausgedünnten Gases um unsere Sonne, aber wohl auch der im pazifischen Meeresboden über  $^{60}\text{Fe}$  entdeckten Supernova-Asche-Ablagerung. Das radioaktive Nachglühen von  $^{26}\text{Al}$  Gammastrahlung liefert weitere Teile wissenschaftlicher Beweisführungen.

### **Antimaterie im interstellaren Raum**

Die meisten detaillierteren Erkenntnisse aus der Analyse von Emissionslinien im Gammabereich stammen aus den vergangenen 15 Jahren. Doch der erste Nachweis einer Gammalinie erfolgte bereits 1970 mit einem Balloninstrument der Rice-Universität (USA). Diese Linie zeigte eine Energie von etwa 0.5 MeV und wurde deshalb sofort der Annihilation von Elektronen und deren Antiteilchen Positronen zugeordnet. Da sich sämtliche eventuell im Urknall freigesetzte Antimaterie bereits mit ihrem Pendant der normalen Materie

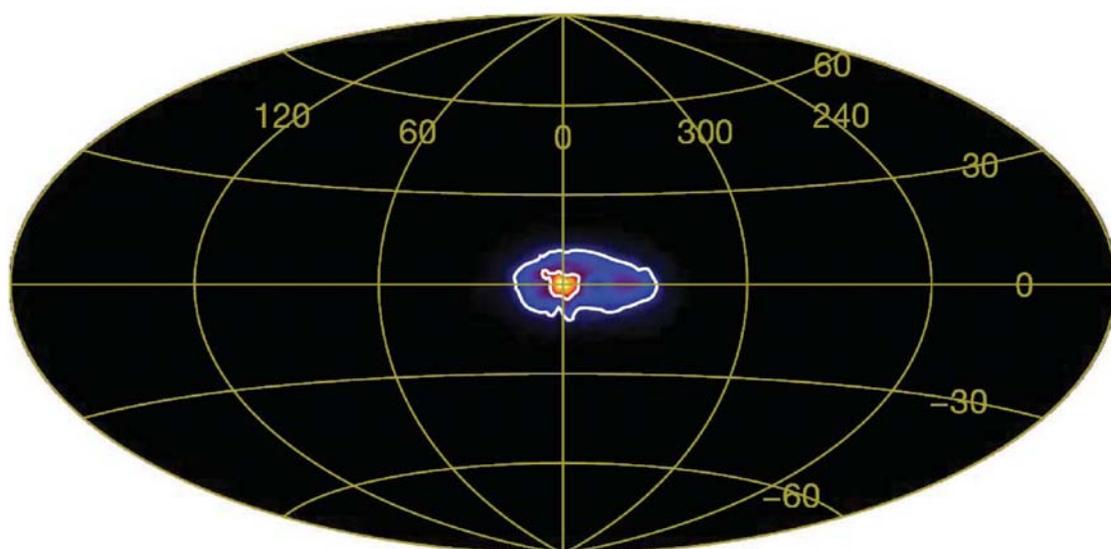
vernichtet hat, stellt sich demnach die Frage: Woher stammt diese neue Antimaterie?

Grundsätzlich entstehen Positronen beim radioaktiven  $\beta^+$ -Zerfall. Entsprechend  $E=mc^2$  wandelt sich das Positron beim Zusammentreffen mit einem Elektron in Energie um. Aufgrund der Erhaltungssätze für Energie-Impuls, Ladung und Spin werden bei dieser Positron-Elektron-Annihilation meist zwei Gammaphotonen mit identischer Energie von 511 keV aber entgegengesetzten Spins und Impulsen frei.

Bevor es zur Annihilation kommt, entsteht ein exotisches Wasserstoff-ähnliches Elektron-Positron-Atom (Positronium). Das kann sich jedoch erst dann bilden, wenn die sich anfänglich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit fortbewegenden Positronen im interstellaren Gas erheblich abgebremst wurden. Die Signatur dieses Prozesses kann man mit der 511-keV-Linie und dem zugehörigen Positronium-Kontinuumsspektrum aus dem 3-Photonen-Zerfall des im Triplett-Zustand (parallele Spinorientierung von Elektron und Positron) annihilierenden Atoms untersuchen, und daraus die charakteristische Dichte und Ionisation des interstellaren Mediums am Ort der Annihilation entschlüsseln.

Wie schon gesagt, erzeugen Supernovae erhebliche Mengen des instabilen Isotops  $^{56}\text{Ni}$ , das in 19 % seiner Zerfälle zu dem stabilen Endprodukt  $^{56}\text{Fe}$  zerfällt. Dabei wird auch jeweils ein Positron freigesetzt. Auch  $^{26}\text{Al}$  oder etwa die in Nova-Explosionen erzeugten  $^{13}\text{N}$ - und  $^{18}\text{F}$ -Isotope zerfallen unter Emission von Positronen. Deshalb wurde die Gammalinie bei 511 keV anfangs diesen Nukleosynthese-Quellen zugeordnet.

In den siebziger und achtziger Jahren sorgten dann die Ergebnisse von Gammadetektoren an Stratosphärenballons für Aufsehen, weil die Quelle im Zentrum der Milchstraße ungewöhnlich stark variabel zu sein schien. Vom Great Annihilator war schon die Rede, bis dann Instrumente auf den Satelliten



**Abb. 6:** Die Elektronen-Positronen-Annihilationsstrahlung konzentriert sich um das galaktische Zentrum, während die Ebene der Galaxis nur schwach zu erkennen ist. Der Ursprung dieser Strahlung ist unklar, Hypothesen zum Teil widersprüchlich.

„Solar Maximum“ und „Compton“ zeigten, dass die variablen Intensitäten offenbar den unzureichend kalibrierten Instrumenten und den schwierigen Messbedingungen zuzuschreiben waren: Die Intensität der Annihilationslinie erschien nun konstant und vorwiegend aus der inneren Galaxis zu kommen. Sie entsprach einer Rate von etwa  $10^{43}$  Annihilationen pro Sekunde bei einer angenommenen Distanz zum galaktischen Zentrum von 25 000 Lichtjahren.

Doch wie so oft in der Astronomie, brachte auch hier ein neues, empfindlicheres Teleskop die vorherrschende Lehrmeinung erneut ins Wanken. Kürzlich zeigte das Spektrometer auf INTEGRAL ganz deutlich ein ausgedehntes kugelsymmetrisches Emissionsgebiet der 511-keV-Linie. Dieses ist erstaunlich genau in der Galaxis zentriert und so dominant, dass die galaktische Ebene kaum als Quelle von Annihilationsstrahlung auszumachen ist (Abbildung 6) [6,7]. Dies widerspricht klar der Nukleosynthesetheorie als Quelle der Positronen, da deren Quellen vorwiegend in den Spiralarmen der Milchstraße verteilt sind und daher in der gesamten galaktischen Ebene auftauchen müssten. Auch andere plausible Quellen, wie Plasma-ausstoßende Pulsare und Doppelsterne, bevölkern die galaktische Ebene und den Zentralbereich, und sind unvereinbar mit der jetzt gefundenen Verteilung der Annihilations-Gammastrahlung.

Kürzlich wurde mit INTEGRAL die vergleichsweise leuchtschwache Annihilationsemission der galaktischen Ebene als deutlich asymmetrisch erkannt [7] (siehe auch Abbildung 6). Aus einer analogen Asymmetrie in der galaktischen Verteilung von Binärsternsystemen wurde daher vermutet, dass auch im helleren Zentralbereich ähnliche Binärsternsysteme einen grossen Teil der Annihilationsemission beitragen – wenn auch sicher nicht genug, um die gesamte Leuchtkraft aus diesem Bereich zu erklären.

Es wird spannend sein, inwieweit in den kommenden Jahren die Beiträge der vermuteten stellaren Positronenquellen durch genauere Messungen und theoretische Studien (vor allem der Positronen-Ausbreitung im interstellaren Raum) eingegrenzt werden können. Denn es steht eine spektakuläre Interpretation dieser ausgedehnten, symmetrischen Annihilations-Emission aus dem Zerfall Dunkler Materie bereit: Integral könnte erstmals direkt astronomisch die Dunkle Materie, die sich im Schwerefeld der Galaxis häufen sollte, über ihren Zerfall nachgewiesen haben [8]. Tatsächlich werden vergleichsweise leichte skalare Teilchen als Kandidaten für die Dunkle Materie vorhergesagt, die über Positronen als Zwischenzustand zerfallen.

### **Wie es weitergeht**

Gammastrahlung aus kosmischer Radioaktivität eröffnet uns einen neuen Blick auf physikalische Vorgänge im Universum – über Strahlung, deren Ursache in atomaren Kernen liegt. „Compton“ und INTEGRAL haben die Basis bereitet. Es gibt Projektvorschläge für verbesserte Instrumente: Im Zukunftsprogramm „Cosmic Vision 2015-2025“ der ESA verpasste ein solcher Vorschlag in der aktuellen Ausschreibung knapp einen „Podestplatz“ der wenigen direkt finanziell geförderten Projekt-Detailstudien. Das grundsätzliche Interesse an der Ausweitung der Astronomie um das Beobachtungsfenster kernphysikalischer Signaturen ist offensichtlich.

Die beträchtlichen instrumentellen Herausforderungen an Gammateleskope im MeV-Bereich haben die Faszination und das astrophysikalische Potential dieses Feldes in jüngster Vergangenheit oft überlagert. Im Gamma-Bereich wird zunächst das Gebiet der Elementarteilchen-Astrophysik bei GeV-Energien mit dem Start des NASA GLAST Satelliten (auch mit deutscher Beteiligung) vertieft. Andere Bereiche, wie die Suche nach Dunkler Materie und Dunkler Energie oder die Untersuchung Schwarzer Löcher, locken mit ihrer Faszination des Exotischen. Die hierfür projektierten, deutlich empfindlicheren Röntgenteleskope der nächsten Generation werden derzeit auch zu hohen Energien hin optimiert, und sollten dann wenigstens bei den niederenergetischen  $^{44}\text{Ti}$ -Linien wichtige räumlich hochaufgelöste Messungen auch nuklearer Linien ermöglichen.

Es wird spannend sein, angesichts der Vielfalt astronomischer Beobachtungstechniken die Entwicklung astrophysikalischer Forschung im Kontext kultureller und gesellschaftlicher Entwicklungen dieses Jahrhunderts zu verfolgen.

### **Zusammenfassung**

*Radioaktivität hat den Weg in die Astronomie gefunden: Gammalinien aus dem Zerfall erst kürzlich in Sternen oder Supernovae fusionierten Isotope sind Gegenstand aktueller astrophysikalischer Forschung. Damit sind prinzipiell direktere Messungen der Kernfusions-Bedingungen sowohl im Inneren von Supernova-Explosionen, als auch insgesamt in den jüngsten Sternenerationen in der Galaxis möglich. Neueste Instrumente illustrieren dies mit Gammalinien der  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ - und  $^{26}\text{Al}$  Isotope, und haben nebenbei in der Annihilationslinie von Positronen eine fundamentale astrophysikalische Frage vorgelegt.*

### **Stichworte**

Gammaastronomie, radioaktive Isotope, Kernfusion, Sternentwicklung, Supernovae, Wolf-Rayet Sterne, Nukleosynthese, Positronen, Annihilation, Dunkle Materie, Compton-Observatory, INTEGRAL, SPI.

### **Literatur**

- [1] V. Schönfelder V., Physik in unserer Zeit **2004** 35 (6), 264.
- [2] R. Diehl, N. Prantzos, P. v. Ballmoos, Nucl. Phys. A **2006**, 777, 70.
- [3] J. Vink, Adv. Space Res. **2005**, 35, 976.
- [4] L.-S. The u.a., Astron. Astrophys. **2006**, 450, 1037.
- [5] R. Diehl u.a., Nature **2006**, 439, 45.
- [6] J. Knödseder u.a., Astron. Astrophys. **2005**, 411, 513.
- [7] G. Weidenspointer u.a., Nature **2008**, 451, 159
- [8] C. Boehm, P. Fayet, J. Silk, Phys. Rev. D **2004**, 69, 101302.

### **Internet**

Gammaastronomie und radioaktive Isotope

[www.mpe.mpg.de/~rod/rod.html](http://www.mpe.mpg.de/~rod/rod.html)

Gammaobservatorium Integral

[sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=21](http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=21) and

[www.mpe.mpg.de/gamma/instruments/integral/www/integral.html](http://www.mpe.mpg.de/gamma/instruments/integral/www/integral.html)

Compton Gamma-Ray Observatory

<http://www.mpe.mpg.de/gamma/instruments/cgro/>

## Die Autoren



Roland Diehl arbeitet in der Hochenergie-Astrophysik-Gruppe des Max-Planck Instituts für extraterrestrische Physik in Garching, und ist Privatdozent an der Technischen Universität München. Er beschäftigt sich mit der Entwicklung von Gamma-Teleskopen und deren Datenanalyse-Methoden, und studiert die „nukleare Astrophysik“ kosmischer Elemententstehung in unterschiedlichen Kontexten.



Dieter H. Hartmann ist Professor für Astrophysik an der Universität in Clemson, South Carolina, USA. Er beschäftigte sich mit Theorien zu Nukleosynthese-Reaktionen in Supernovae, studierte galaktische Entwicklungen der chemischen Zusammensetzung, sowie Theorien zu Gammastrahlen-Ausbrüchen.

## Anschriften

Priv. Doz. Dr. Roland Diehl, Max Planck Institut für extraterrestrische Physik, Gießenbachstraße 1, 85748 Garching. rod@mpe.mpg.de.

Prof. Dr. Dieter Hartmann, Clemson University, Department of Physics and Astronomy, Clemson, SC 29634-0978, USA. hdieter@clemson.edu

<sup>1)</sup> INTEGRAL ist ein ESA Projekt mit durch die Mitgliedsländer bereitgestellten Instrumenten und Datenzentrum, speziell aus den PI-Nationen Dänemark, Frankreich, Deutschland, Italien, Schweiz, und Spanien. Das SPI Spektrometer wurde unter Federführung der französischen CNES hergestellt, mit einem von Deutschland unter DLR-50.0G.9503.0 finanzierten Antikoinzidenz-System.