

Wissenschaft für Alle

Mittwoch, den 25. September 2002

Die Geister, die ich rief ... Grundlagenforschung zur Beseitigung von radioaktivem Abfall

Einleitung

Das Problem des radioaktiven Abfalls ist eine Folge der Nutzung von spaltbarem Material zur *Energiegewinnung*. Daher ist es zunächst sinnvoll, den natürlichen *Energiehaushalt der Erde* zu betrachten, der von der Sonne und von radioaktiven Zerfällen im Erdinnern gespeist wird. Dann werden wir die technische Nutzung der *fossilen Brennstoffe* und ihren Einfluss auf die Biosphäre beschreiben. Weiter wird der Ursprung der *in Kernreaktoren gewonnenen Energie* verfolgt. Wir untersuchen die Prozesse, die in einem Kernreaktor für den radioaktiven Abfall verantwortlich sind. In letzter Zeit werden weltweit ernsthaft Pläne für ein Verfahren verfolgt, mit dem man die *Gefährlichkeit des radioaktiven Abfalls* entscheidend *vermindern* kann. Zur Planung einer solchen Anlage werden in Europa, Amerika und Japan grundlegende Forschungsarbeiten durchgeführt. Die GSI ist mit ihren einzigartigen technischen Einrichtungen an dieser Forschung beteiligt und hat schon *wichtige neue Erkenntnisse* über die Physik einiger in einer solchen Anlage ablaufenden Prozesse gewonnen. Die Ergebnisse dieser Forschung sind auch von großer Bedeutung für die Planung des GSI Zukunftsprojektes, da sie bessere Vorhersagen über die *Intensitäten von Strahlen exotischer Kerne* ermöglichen.

Die Erde, die Biosphäre, ein Bereich mit besonderen Eigenschaften.

Die Biosphäre auf unserer Erde ist ein über lange Zeiträume bestehender „Schutzraum“ für die Entstehung von Leben und seine Weiterentwicklung. Nach neueren Erkenntnissen sind die Bedingungen im Weltraum für das langzeitige Bestehen eines solchen Schutzraumes selten. Gerade in den äußeren Bereichen unserer Galaxie, wo sich unser Sonnensystem befindet, sind die Bedingungen optimal. Weiter innen ist die Strahlung zu stark, und zu viele „Katastrophen“ wie Sternexplosionen, Zusammenstöße von Himmelskörpern und große vorbeifliegende Objekte, die eventuell vorhandene Planeten aus der Bahn werfen. Weiter außen ist der Gehalt an schweren Elementen zu gering zur Bildung von Planeten.

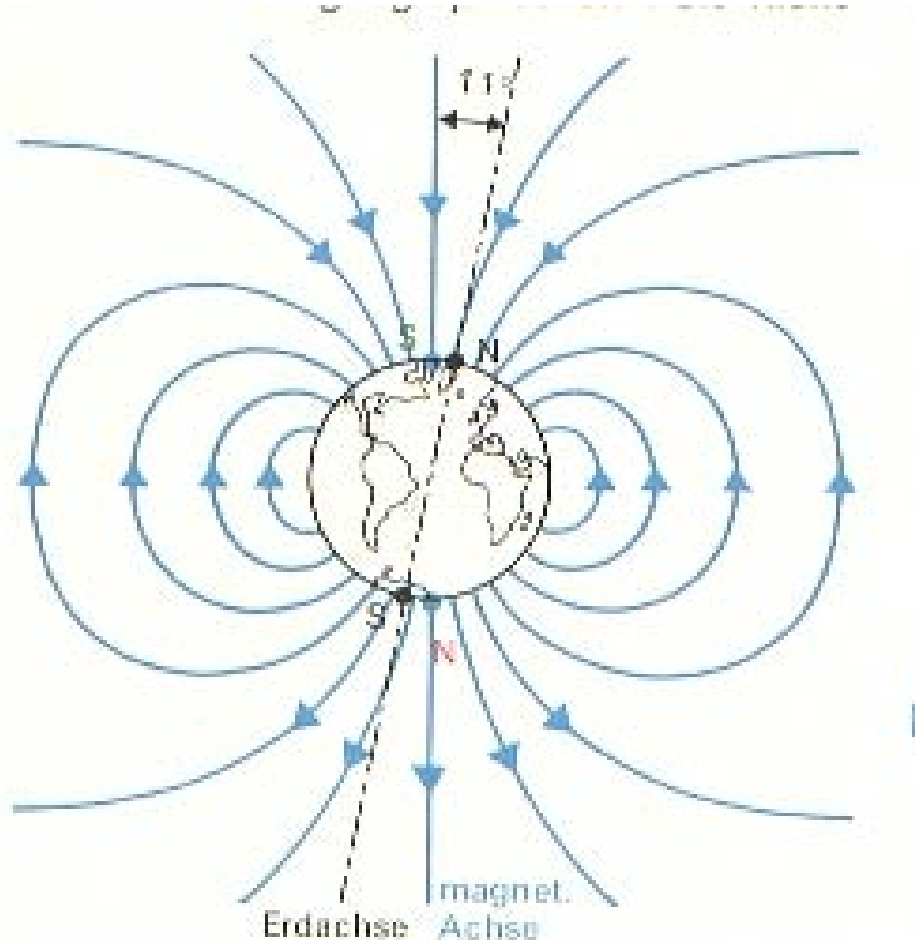


Die Umweltbedingungen - Energiebetrachtungen

Die Wärme: 0°C bis 40° Celsius (Wasser muss in flüssiger Form vorliegen; Eiweiße dürfen nicht gerinnen) – entsprechend einer Wärmestrahlung von $1/40$ Elektronen-Volt mit einer Schwankung von nur $\pm 6\%$ ist für höhere Lebensformen auf der Erde notwendig.

Die Strahlung von der Sonne 5000°C – entsprechend 0.5 Elektronen-Volt (20 mal größer als die Wärmestrahlung unserer Erdumgebung) ist der „Kraftstoff“ für den Motor des Lebens, die Photosynthese im Blattgrün der Pflanzen, der einzigen Energiequelle, die das Leben in Gang hält. Die Lebewesen der Erde (z. B. wir Menschen durch die Pigmente in unserer Haut) sind weitgehend geschützt gegen die Energie des sichtbaren Lichtes. Nur die ultraviolette Strahlung, der hochenergetische Teil der Sonnenstrahlung ist gefährlich für uns.

(Im Innern der Sonne herrscht eine weit höhere Temperatur von 20 Millionen Grad – entsprechend 2570 eV , von der wir aber zum Glück durch die „kühlere“ Sonnenoberfläche abgeschirmt sind. Über die Prozesse im Innern der Sonne werden wir später noch sprechen.)



58.1 Erdnahes Magnetfeld

Schutzmechanismen gegen hochenergetische Teilchen und Strahlung

Die Erde verfügt über besondere Schutzmechanismen, die hochenergetische Teilchen und Strahlung aus dem Weltraum abwehren.

- Das Erd-Magnetfeld gegen hochenergetische geladene Teilchen (Höhenstrahlung) aus besonders aktiven Bereichen des Weltraumes.
- Die Luftschicht „schluckt“ den größten Teil der noch durchkommenden Höhenstrahlung.
- Die Ozon-Schicht gegen kurzwellige Strahlung (UV) von der Sonne.

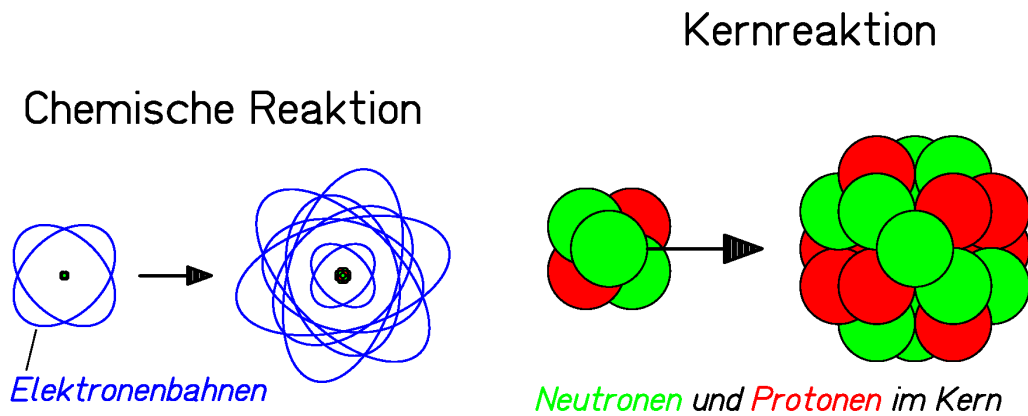
All das trägt entscheidend dazu bei, die Erdoberfläche so lebensfreundlich zu machen.



Fossile Energie.

Aus der von lebenden Organismen gespeicherten Sonnenenergie in Form von Kohle, Erdöl, Erdgas wird seit vielen Jahrhunderten in immer größerem Maßstab Energie gewonnen. „Verbrennen“ ist das Verbinden von Elementen mit Elektronenüberschuss mit Sauerstoff als Elektronen-Spender. Wie alle chemischen Reaktionen sind Energien im Bereich von wenigen Elektronen-Volt (entsprechend etwa der Energie der Photonen des sichtbaren Lichtes der Sonne) im Spiel. Die Kerne bleiben unverändert!

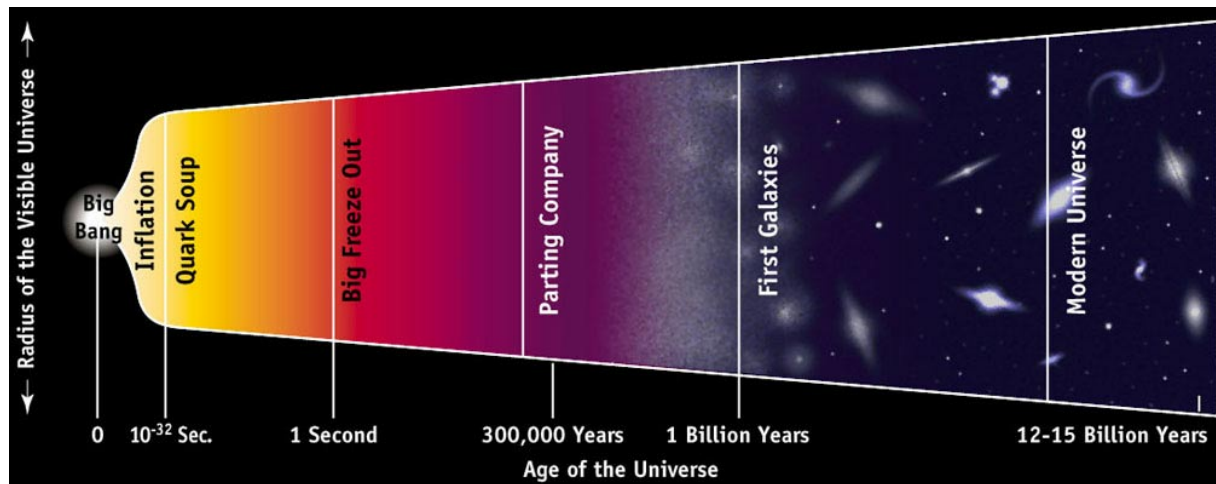
(Molekülbild durch Verbrennen: zum Beispiel $C + 2 \times O \rightarrow CO_2$)
Wärme- und Lichtstrahlen aus dem Energieinhalte der fossilen Brennstoffe sind vollkommen ungefährlich. Allerdings hat das Verbrennen von fossilen Stoffen in großem Maßstab in indirekter Weise einen wichtigen Einfluss auf die Gesamt-Energiebilanz der Erde durch den Treibhaus-Effekt, der zum großen Teil auf ein Ansteigen der CO_2 Konzentration in der Atmosphäre zurückzuführen ist. Obwohl der direkte Anteil der vom Menschen freigesetzten Energie vernachlässigbar ist, wird die Bilanz von Aufnahme und Abgabe der Sonnenenergie gestört. Das Verbrennen fossiler Stoffe kann also auf Dauer einen verheerenden Effekt auf die Biosphäre der Erde haben.



Chemische Reaktionen gegen Kern-Reaktionen - Grundsätzliches.

Im letzten Jahrhundert hat die Menschheit begonnen, Kernenergie technisch zu nutzen. Damit hat sie wie Goethes Zauberlehrling ein mächtiges Werkzeug in die Hand bekommen, das sie zu meistern lernen musste und noch muss. Zunächst wollen wir den grundsätzlichen Unterschied zwischen chemischen Reaktionen und Kern-Reaktionen beschreiben.

- *Chemische Reaktionen* spielen sich in den Elektronen der Atomhülle ab. Sie sind Umordnungen von Atomen zu verschiedenen Molekülen, die kleinste Einheit von chemischen Verbindungen. Energiegewinn oder -zufuhr hat den Ursprung in der elektrischen Wechselwirkung der Elektronen in der Hülle der Atome. Die typischen Energien, die in chemischen Reaktionen umgesetzt werden, sind im Bereich von *wenigen Elektronen-Volt*.
- *Kern-Reaktionen* spielen sich in den Atomkernen ab. Sie sind Umordnungen von Protonen und Neutronen, den Bestandteilen der Kerne, zu verschiedenen Elementen und Isotopen. Die typischen Energien in Kern-Reaktionen sind im Bereich von einigen *Millionen Elektronen-Volt*. Das ist eine Million mal mehr als bei chemischen Reaktionen!

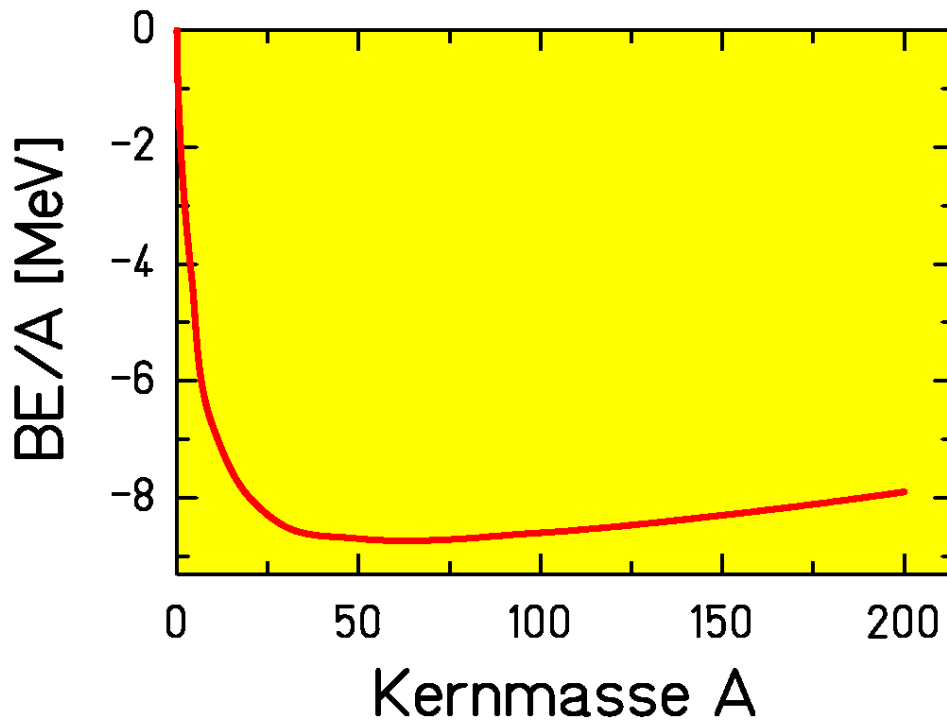


Der Urknall

Viele entscheidende Prozesse im Weltraum, in der Vergangenheit und in der Gegenwart sind verbunden mit *Kernumwandlungen*.

Der Urknall am Anfang unseres Universums vor etwa 15 Milliarden Jahren hinterließ im Wesentlichen *Wasserstoff* (1 Proton), den einfachsten Kernbaustein, und Helium, das aus 2 Protonen und 2 Neutronen besteht. (Bildung der verschiedenen Elemente von 1 Mikrosekunde bis 3 Minuten nach Beginn des Universums.)

Bindungsenergie



Energiebetrachtung von Kernen, die besondere Rolle von Eisen

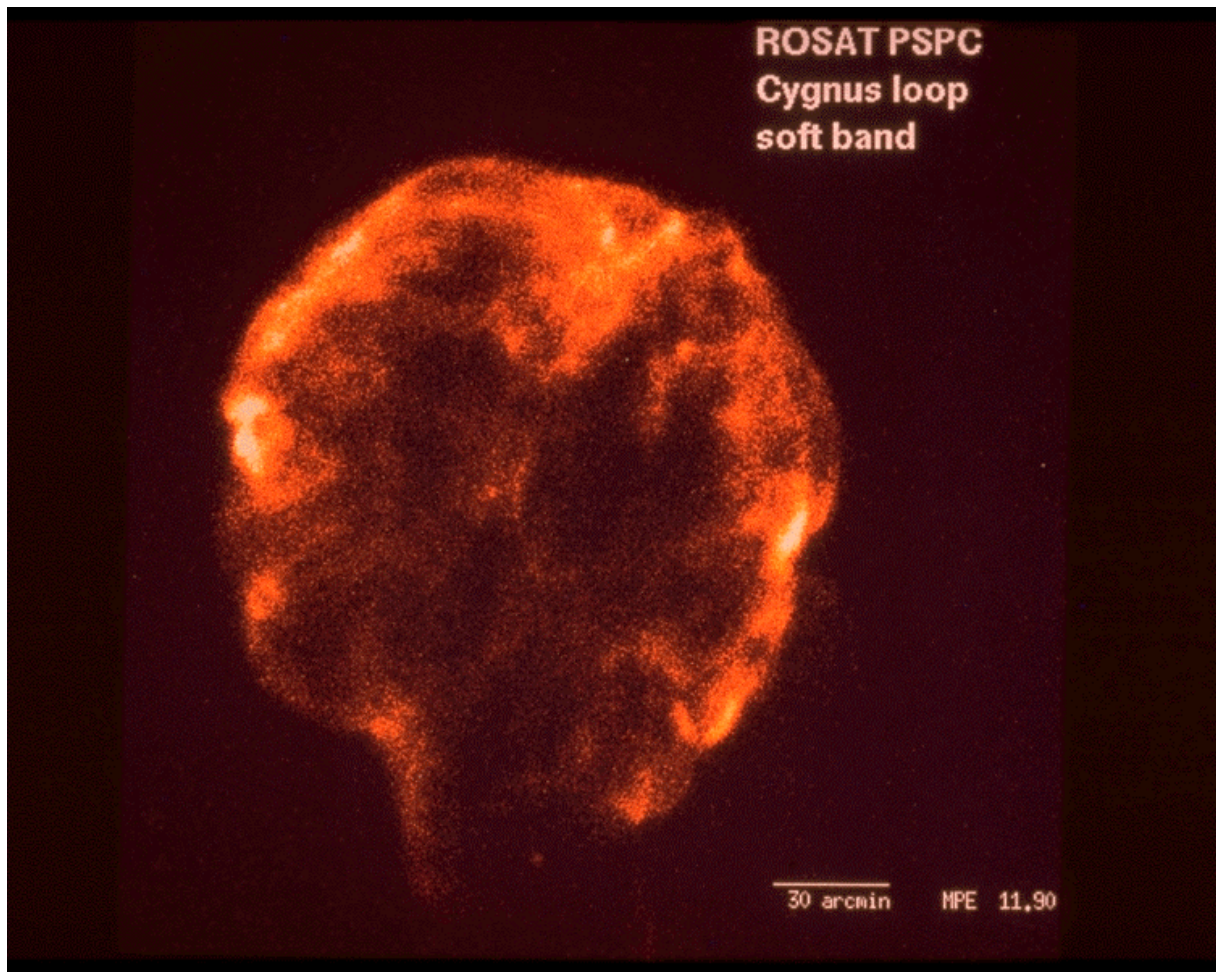
Einzelne Protonen sind „Brennstoff“. Durch Zusammenfügen von Protonen zu größeren Kernen wird Energie frei, bis man Eisen (26 Protonen, Masse $A = 56$) erreicht. Schwerere Kerne sind wieder weniger gebunden.



Aufnahme des Orion Nebels, eine mögliche Geburtsstätte von Sternen.

Die erste Sternengeneration, Bildung der Kerne bis zum Eisen

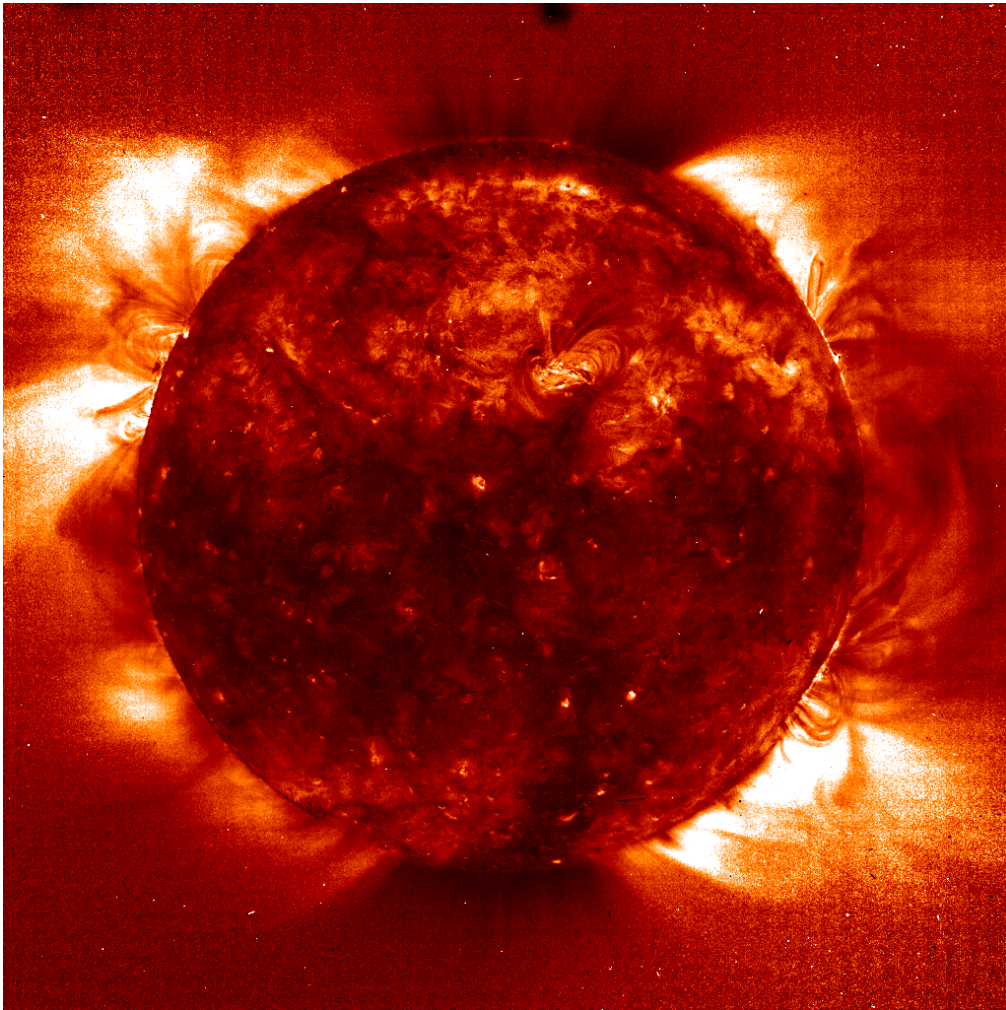
Aus den Gaswolken nach dem Urknall bildeten sich „Klumpen“, verdichteten sich zu Sternen durch die Schwerkraft. In dieser ersten Generation von Sternen „verbrannte“ ein Teil des Wasserstoffs (der freien Protonen) bis zum Eisen (26 Protonen) durch schrittweises „Zusammenfügen“ der Protonen in Zusammenstößen im Innern der Sterne bei einer Temperatur von typisch 20 Millionen Grad Celsius. (Unter Verbrennen verstehen wir hier allgemein eine Umwandlung unter Abgabe von Energie! Die „Asche“ einer Kernreaktion ist natürlich etwas anderes als die beim chemischen Verbrennen anfallende Schlacke.) Einen ähnlichen Prozess versucht der Mensch bisher ohne Erfolg im sogenannten „Fusionsreaktor“ zur kontrollierten Energiegewinnung in Gang zu bringen. In der Wasserstoffbombe wird dieser Prozess explosionsartig ausgelöst.



Die Überreste einer Supernova

Das Ende eines Sternes, Bildung der schwersten Elemente

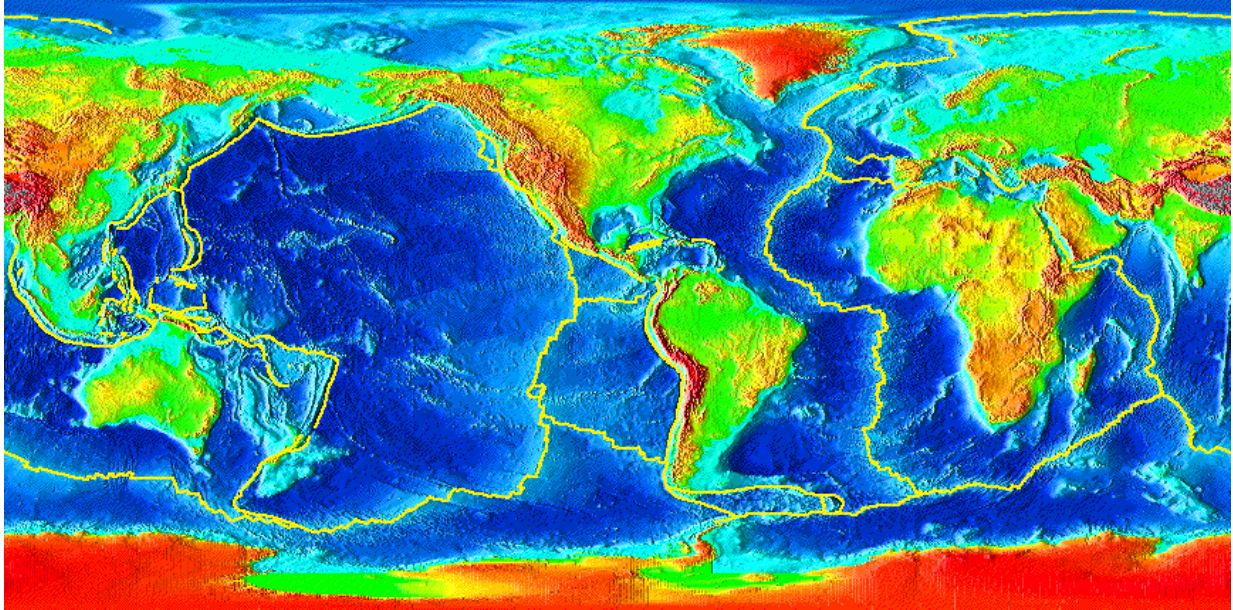
Nach „Ausbrennen“ des Sterns, wenn (fast) der ganze Stern zu Eisen verbrannt ist, implodiert der Stern (Supernova). Ein Teil der Kerne zerbricht. Einzelne Protonen und Neutronen entstehen in großer Anzahl. Für die Dauer des Kollapses (Sekunden bis Tage) lagern sich einzelne Neutronen und Protonen nach und nach an die Kerne an. Es bilden sich noch schwerere Kerne, bis über das Uran hinaus. Diese sehr schweren Kerne sind wieder weniger stark gebunden als die Ursprungskerne in der Nähe von Eisen. In diese schwersten Kerne wird also im Sternenkollaps Energie gepumpt. Die schwersten Kerne stellen wieder einen Brennstoff dar. Bei ihrem eventuellen Zerfall wird Energie frei.



Ultraviolett-Aufnahme der Sonne vom „Extreme Ultraviolet Image Telescope“

Das Sonnensystem

Das Sonnensystem wurde vor 4.7 Milliarden Jahren gebildet aus *Rückständen früherer Supernovä*, angereichert mit interstellarem Wasserstoff. Es enthält alle stabilen Elemente zwischen Wasserstoff (1 Proton) bis Uran (92 Protonen). Die Sonne hat einen großen Anteil aus interstellarem Wasserstoff. Diesen verbrennt sie wie ein Stern der ersten Generation. Die Erde hat sich aus den schwereren Rückständen der früheren Supernovä gebildet. Sie ist zu klein, die Schwerkraft war nicht ausreichend, um den Wasserstoff zu halten.

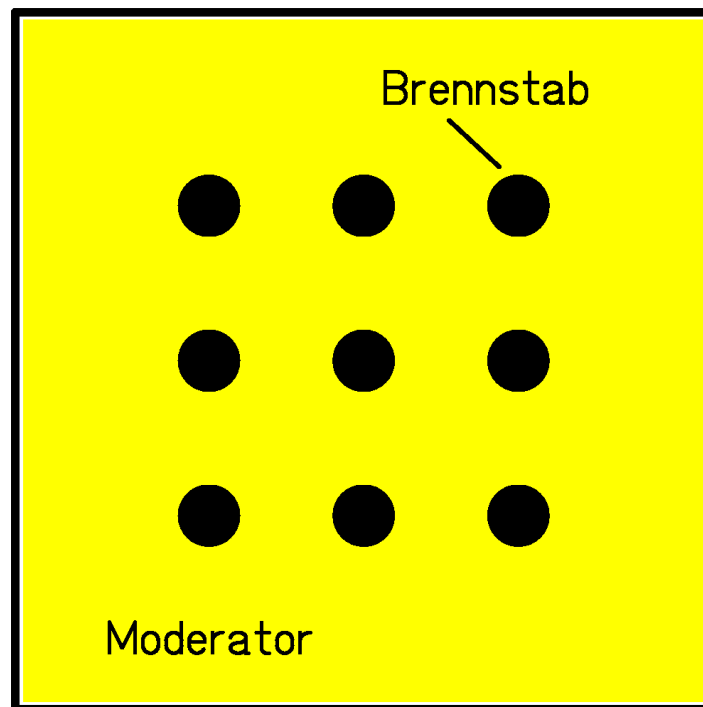


Die Grenzen der Kontinentalplatten auf der Erde

Natürliche Radioaktivität

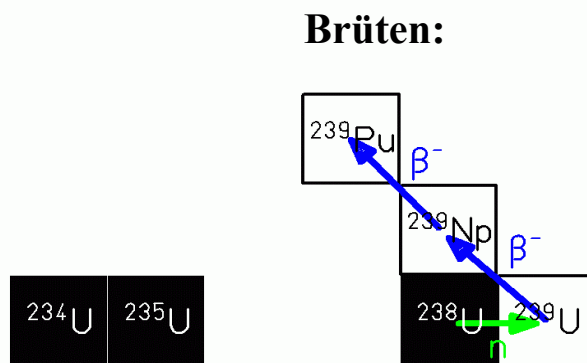
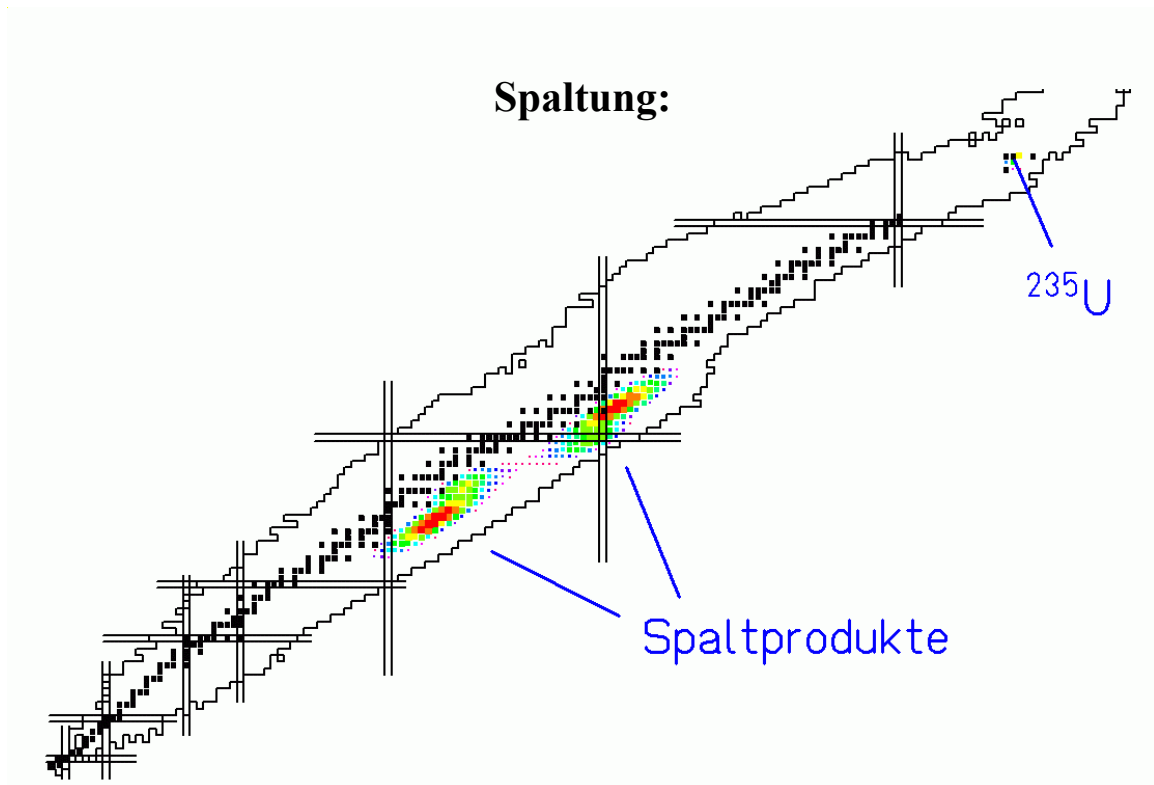
Die Erde wird „geheizt“ vom natürlichen Zerfall der schweren Kerne (Uran, Thorium) im Erdinnern durch Aussendung von Alpha-Teilchen (Helium-Kernen). Diese Energie kommt aus der in einer früheren Supernova in der Bildung von schweren Elementen gespeicherten Energie.

Dieser Zerfall heizt das Erdinnere weiter an, so dass es flüssig bleibt. Das ist sehr wichtig für die *Plattentektonik*. Dadurch entstehen Berge und Kontinente, ja Festland überhaupt. Ohne diesen Prozess wäre die ganze Erde ziemlich gleichmäßig von Wasser bedeckt.



Spaltreaktoren

Seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts wird die in Supernovae gespeicherte Energie in Spaltreaktoren genutzt. Spaltung wird kontrolliert eingeleitet durch Einfang von Neutronen. Spaltreaktoren „verbrennen“ hauptsächlich ^{235}U , das zu einem kleinen Teil im natürlichen Uran vorkommt. Das Uran ist in Brennstäben angeordnet und *verbrennt kontrolliert*. (In Kernwaffen verbrennt spaltbares Material (^{235}U oder ^{239}Pu) explosionsartig.)



Der Abfall

Beim Betrieb des Reaktors entstehen eine Reihe von radioaktiven Kernen durch Spaltung und Brüten. Spaltprodukte und gebrütete Aktiniden „vergiften“ den Reaktor, weil sie Neutronen wegfangen. Lange bevor das Uran aus den Brennstäben aufgebraucht ist, müssen sie aufbereitet und ausgetauscht werden. Eine Industrie zur Wiederaufbereitung von Kern-Brenn-Elementen wurde notwendig. In diesen Anlagen fallen größere Mengen von *radioaktivem Abfall* an. Ähnlich der Lage von Goethes Zauberlehrling hat die Menschheit bisher keine befriedigende Lösung des Problems gefunden. Mehr und mehr radioaktiver Abfall fällt an und vergrößert das Problem.

Bilanz der Reaktionsprodukte

- **235U: Brennstoff (Vorräte für \approx 200 Jahre)**
- **Spaltprodukte:**

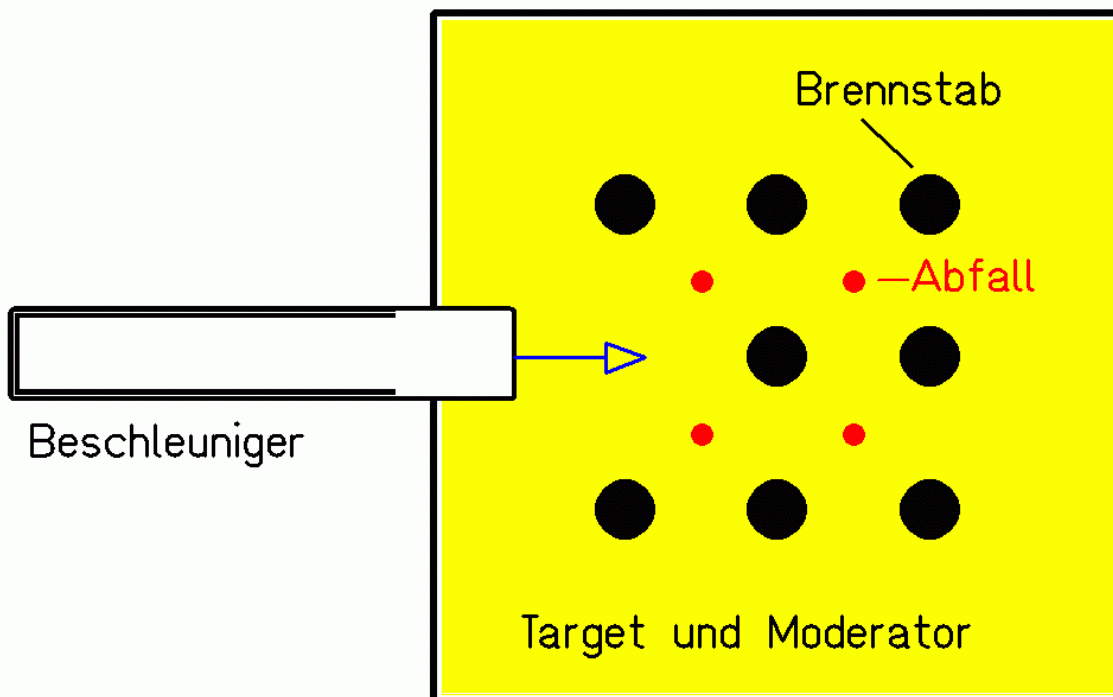
Isotop	Lebensdauer	900 MW, 1 Jahr
79Se	70000 Jahre	0,1 kg
93Zr	1,5 Millionen Jahre	15,5kg
99Tc	210000 Jahre	17,7 kg
107Pd	6,5 Millionen Jahre	4,4 kg
126Sn	10000 Jahre	0,44 kg
129I	15,7 Millionen Jahre	3,9 kg
135Cs	2 Millionen Jahre	7,7 kg

- **239Pu: Brennstoff oder gefährlicher Abfall?**

Isotop	Lebensdauer	900 MW, 1 Jahr
239Pu	24119 Jahre	123,1 kg

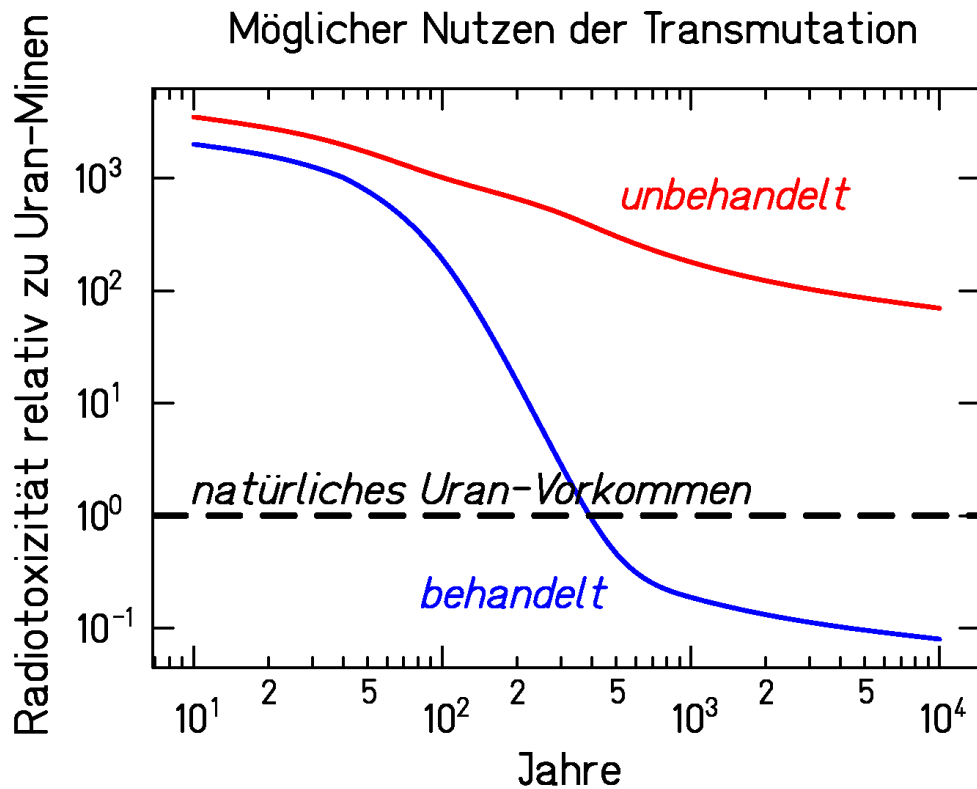
- **Andere erbrütete Aktiniden:**
Viele nicht spaltbar mit thermischen Neutronen

Die Mengen des radioaktiven Abfalls sind nicht sehr groß, etwa eine Million mal kleiner als bei fossilen Brennstoffen, aber die Stoffe sind sehr gefährlich.



Eine Idee zum Beseitigen des radioaktiven Abfalls: der Beschleuniger-getriebene Reaktor

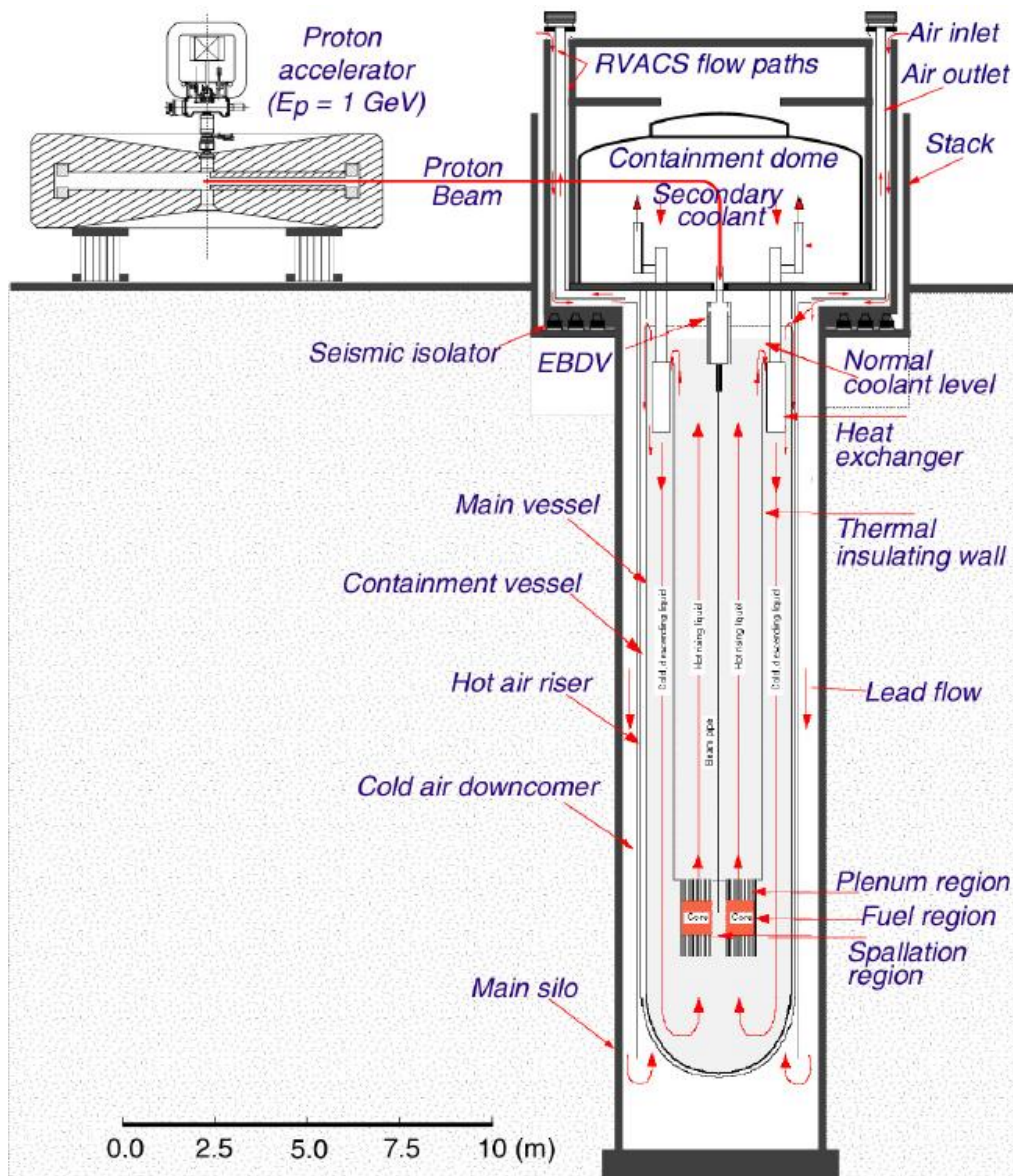
Bowman (Amerika) und Rubbia (Europa) haben vor wenigen Jahren eine Anlage zum Beseitigen des gefährlichsten Teils des radioaktiven Abfalls vorgeschlagen: Der Hybridreaktor -> Neutronen werden von außen zugeführt, wie „Anblasen eines Grillfeuers mit einem Föhn“. Das wird indirekt durch Einführung eines Protonenstrahls (oder eventuell Deutronenstrahls) von 1 GeV aus einem Beschleuniger getan. Damit kann der Reaktor auch noch betrieben werden, wenn er „vergiftet“ ist. Man kann ihn sogar absichtlich mit radioaktivem Abfall vergiften, und dann den Abfall mit „verbrennen“. Wenn man die einzelnen Prozesse in einer solchen Anlage genau kennt, kann man vielleicht in ähnlich verantwortungsvoller und souveräner Weise mit den Restprodukten aus Kernreaktionen in Reaktoren umgehen, wie man jetzt mit gefährlichen chemischen Rückständen umgeht. Sie werden nicht mehr nur abgelagert, sondern verwertet oder beseitigt.



Berechnung der Rest-Radioaktivität von radioaktivem Abfall (Ph. Fink, ANL)

Nutzen der Transmutation:

Während unbehandelte radioaktiver Abfall von Kernkraftwerken über viele Jahrtausende hinaus eine Gefahr durch seine Strahlung darstellt, reicht für behandelten Abfall eine beaufsichtigte Lagerung zum Abklingen der Radioaktivität von wenigen hundert Jahren. Damit bleibt man in einem Zeitraum, den man bei unserer heutigen Zivilisation als überschaubar ansehen kann, so dass eine gesicherte Kenntnis über die Gefährlichkeit der Zwischenlager angenommen werden kann.

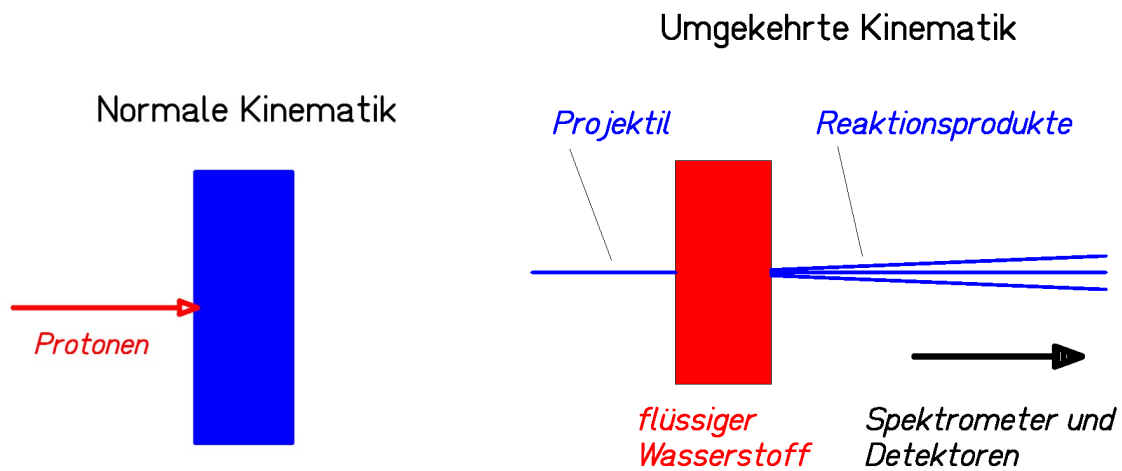


Die Aufgabe der GSI zu Erforschung der Prozesse in einem Beschleuniger-getriebenen Reaktor

Von besonderer Wichtigkeit sind die Wechselwirkungen der Protonen, wenn sie in den Reaktor einfallen. Die Reaktionen von Protonen mit den schweren Kernen im Reaktor bei Energien von einer Milliarde (!) Elektronen-Volt sind nur sehr ungenau bekannt. Für die Planung einer solchen Anlage ist diese Kenntnis aber notwendig. Besonders wichtig sind

- die Energie und die Menge der entstehenden Neutronen,
- die Art, die Menge und die Energie der beim Zertrümmern der getroffenen Kerne entstehenden kleineren Kerne.

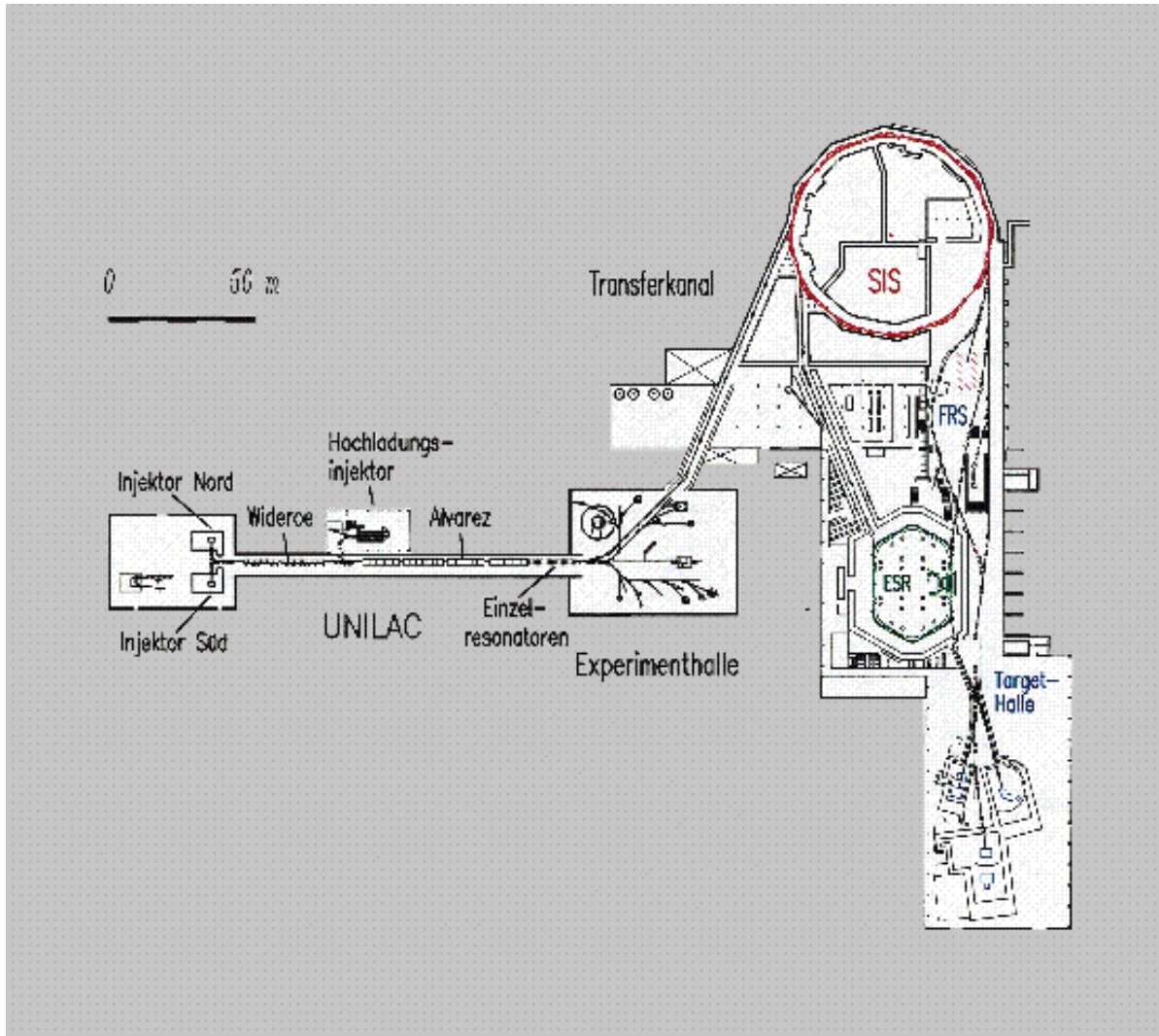
Insbesondere zur Erforschung des zweiten Problems kann die GSI in einzigartiger Weise beitragen.



Der Vorteil von Experimenten in umgekehrter Kinematik

In bisherigen Experimenten wurden, genau wie in der geplanten Anlage, Protonen auf einen Block Materie geschossen, um die sogenannte Spallations-Reaktion zu untersuchen. Kerne, die getroffen werden, verschieben sich nur ein wenig in dem Block, bleiben aber darin stecken. Nach der Bestrahlung versucht man, anhand der Radioaktivität (zumeist Gamma-Strahlung) die gebildeten Kerne zu identifizieren. Neben anderen technischen Schwierigkeiten erhält man keine Information über stabile und sehr kurzlebige Kerne. Damit ist ein hinreichendes Verständnis der Physik der Spallation nicht zu gewinnen.

In der GSI kann man den Spieß umdrehen: Man beschleunigt einzelne schwere Ionen und schießt sie in flüssigen Wasserstoff. Die Physik der Spallation ist genau die selbe, aber die Produkte verlassen das Wasserstofftarget mit großer Geschwindigkeit, fast genau in der ursprünglichen Richtung der schweren Projektile. Mit dem Fragmentseparator können sie im Fluge identifiziert und ihre Energie genau bestimmt werden.

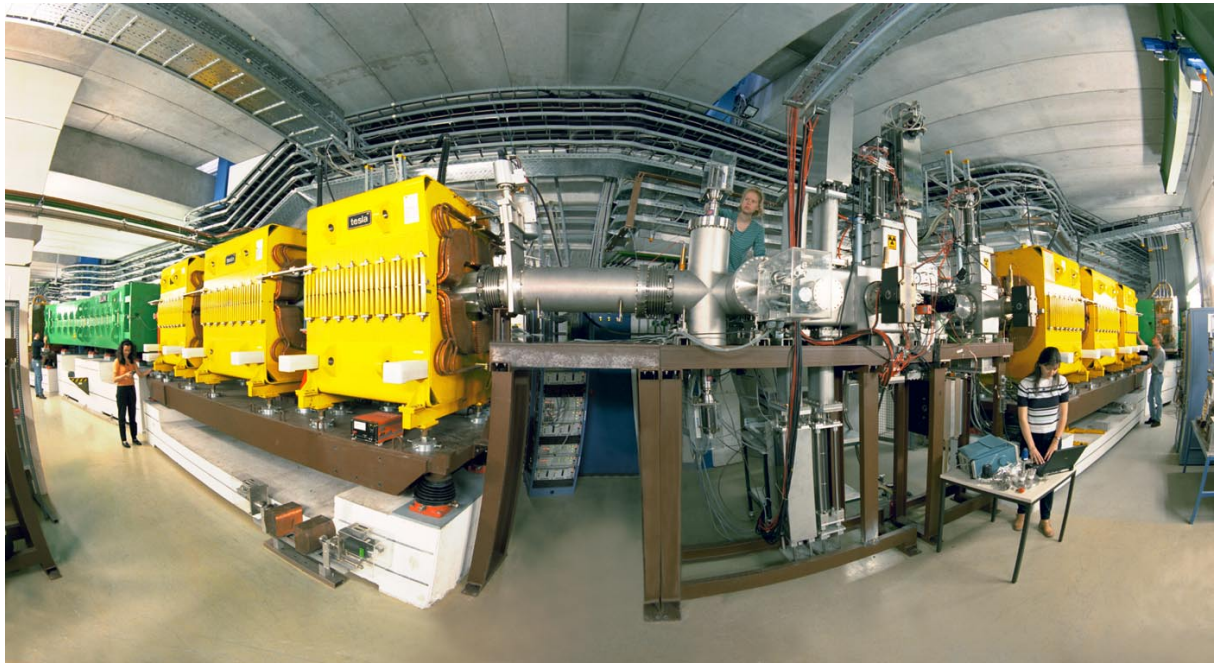


Die vereinten Bemühungen europäischer Partner

Verschiedene europäische Partner haben sich zusammengetan, um diese Experimente zu ermöglichen und durchzuführen:

- GSI: stellt die *Beschleunigeranlage* und den *Fragmentseparator*.
Inzinerationsgruppe: P. Armbruster, P. Napolitani, A. Kelic, M. V. Ricciardi, K.-H. Schmidt, O. Yordanov,
- CEA Saclay: hat das *Wasserstofftarget* (flüssiger Wasserstoff) entwickelt und eingebaut.
- IPN Orsay und Universität Santiago de Compostela nehmen an *Experimenten* und der *Auswertung* teil.

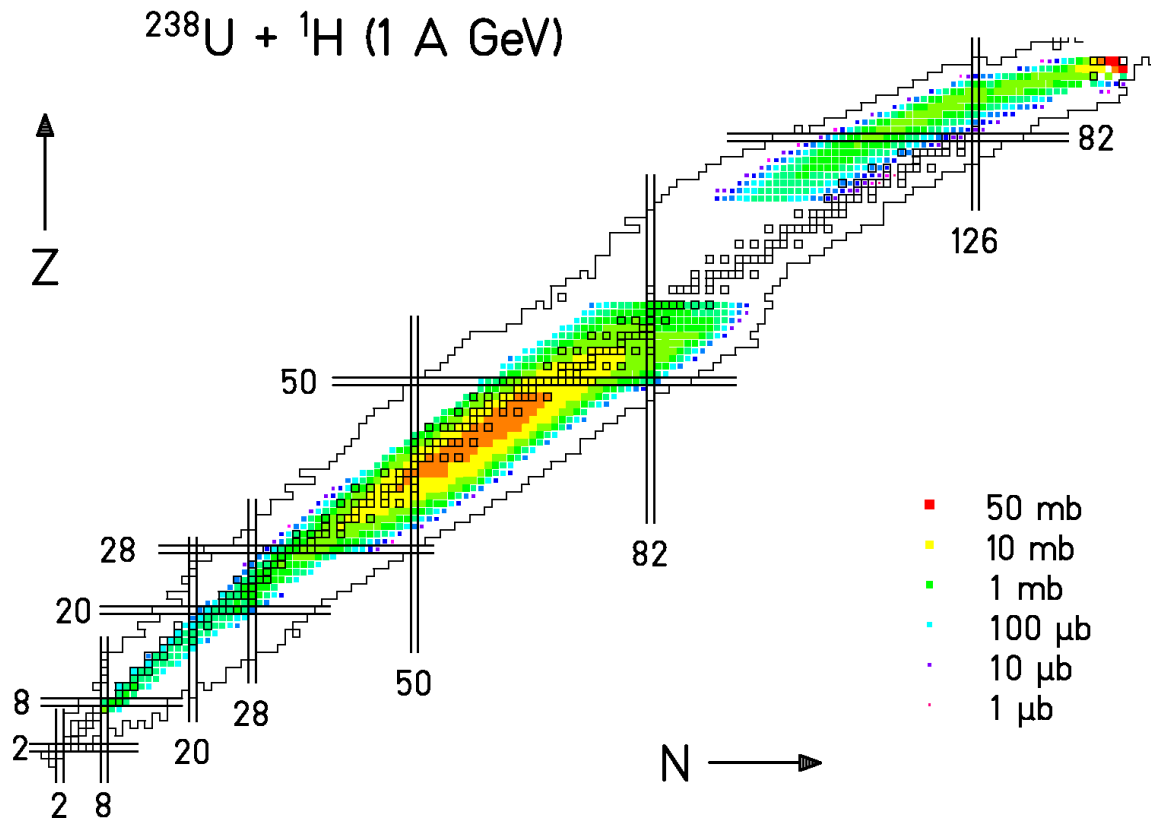
Diese Gruppe ist Teil des *europäischen Forschungsprogramms* HINDAS (High- and Intermediate-energy Nuclear Data vor Accelerator-driven Systems) mit Beteiligung aus Belgien, Deutschland, Frankreich, Niederlande, Schweden, der Schweiz und Spanien. Es wird von der Europäischen Union unterstützt.



Der Fragmenteseparator

Ein Herzstück der Experimente ist der Fragmentseparator, ein mächtiges Magnetspektrometer mit hoher Auflösung. Es ist einzigartig auf der Welt.

Gemessene Produktionsquerschnitte



(Unveröffentlichte Daten von M. Bernas, E. Casarejos, J. Pereira, M. V. Ricciardi, J. Taieb)

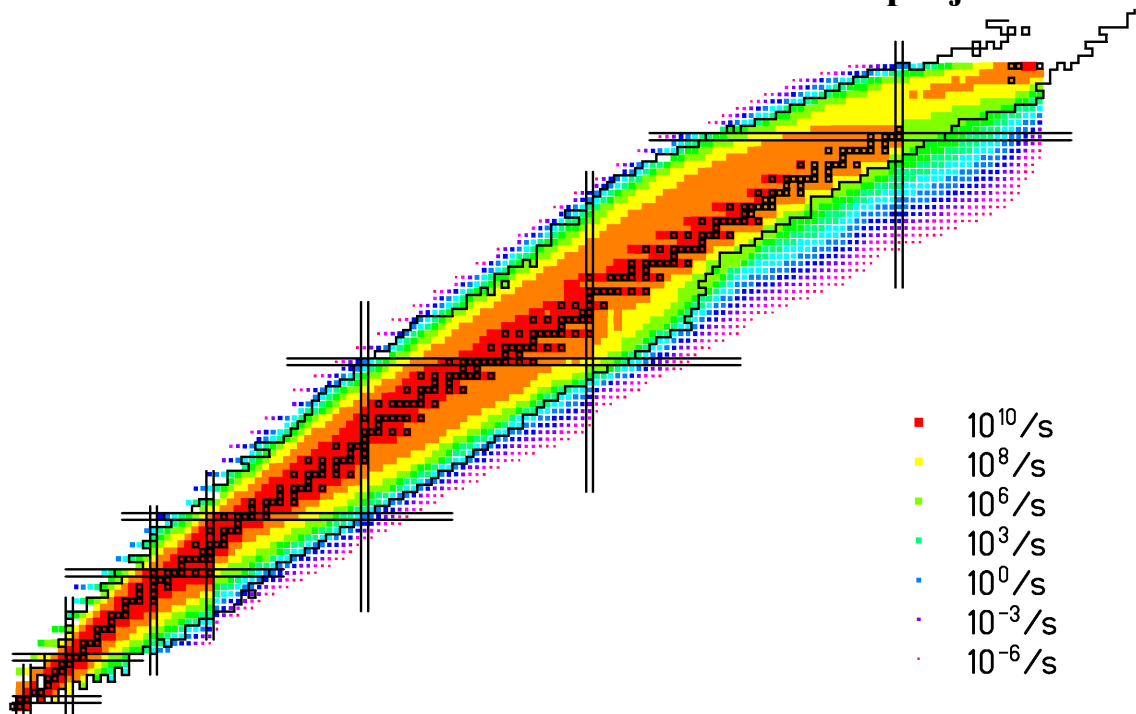
Bisherige Ergebnisse

Komplette Nuklidverteilung der Reaktionen $^{208}\text{Pb} + \text{Protonen}$, $^{208}\text{Pb} + \text{Deuteronen}$, $^{238}\text{U} + \text{Protonen}$, $^{238}\text{U} + \text{Deuteronen}$ konnten vermessen werden. Zusammen sind das etwa 4000 Datenpunkte. Auch die Energieverteilung jedes einzelnen Nuklids wurde vermessen. Bisher wurden 7 wissenschaftliche Arbeiten in internationalen Zeitschriften veröffentlicht.

Damit hat man wesentlich verbessertes Datenmaterial, das eine genauere Planung der Anlage erlaubt. Man erkennt, dass bei diesen Spallationsreaktionen eine große Zahl von radioaktiven Kernen neu entsteht, deren eigentlich ungewünschte Entstehung mit der gewünschten Zerstörung des in die Anlage eingebrachten radioaktiven Abfalls abgewogen werden muss.

Die neuen Daten stellen eine wesentlich verbesserte Grundlage für die Planung von Beschleuniger-getriebene Reaktoren dar. In weiteren Experimente wird das Datenmaterial weiter verbessert.

Berechnete Strahlintensitäten für des GSI Zukunftsprojekt



Die Bedeutung der Ergebnisse für das Zukunftsprojekt der GSI und andere Sekundärstrahl-Projekte

Die genauere Kenntnis der in Spallationsreaktionen gebildeten Nuklide ermöglichte eine realistische Abschätzung der im Zukunftsprojekt der GSI erreichbaren Intensitäten exotischer Kerne für den „Conceptual Design Report“. Auch andere Sekundärstrahl-Projekte, wie EURISOL (die Planung einer zukünftigen europäischen ISOL-Anlage) profitieren von den neuen Erkenntnissen.

Die Bedeutung für die Grundlagenforschung

Weitere Ergebnisse dieser Experimente führten zu einem besseren Verständnis von grundlegenden Eigenschaften von Kernen. Sie erlaubten einen Test der Wechselwirkungen der Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Kern, neue Erkenntnisse über Grenzen der Stabilität von hochangeregten Kernen, die Zähigkeit von Kernmaterie und den Einfluss von Kernstruktur auf die Dynamik der Kernreaktionen. Auch auf diesen Gebieten sind schon einige Arbeiten in internationalen Zeitschriften veröffentlicht worden.

Zusammenfassung

Die Menschheit hat im vorigen Jahrhundert begonnen, die Kernenergie zu nutzen, ohne die damit anfallenden Probleme vollständig zu lösen. Wir hoffen, dass die Grundlagenforschung der GSI dazu beiträgt, dass die Menschheit lernt, mit den schon angefallenen radioaktiven Stoffen verantwortungsvoll und angemessen umzugehen, so wie der Meister zum Schluss in Goethes Gedicht die vom Zauberlehrling freigesetzten Gewalten gezähmt hat. Vielleicht ergibt sich bei entsprechendem Bedarf auch eine neue Chance für die Kernenergie als mögliche Antwort auf den Treibhaus-Effekt.