

# **Wissenschaft für Alle**

Karl-Heinz Schmidt, Mittwoch, den 25. September 2002

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

### **Gliederung**

**Die Erde – Schutzraum im lebensfeindlichen All**

**Fossile Energien**

**Chemische Reaktionen gegen Kernreaktionen**

**Natürliche Prozesse von Kernumwandlungen**

**Kernbrennstoffe und ihr Ursprung**

**Radioaktiver Abfall von Spaltreaktoren**

**Ein Projekt zur Beseitigung des radioaktiven Abfalls**

**Die Aufgaben der Grundlagenforschung**

**Die Instrumente der GSI**

**Forschungsprogramm und Partner**

**Bisherige Ergebnisse**

**Nutzen für andere Gebiete**

## **Die Erde – ein ganz besonderer Schutzraum im lebensfeindlichen All.**

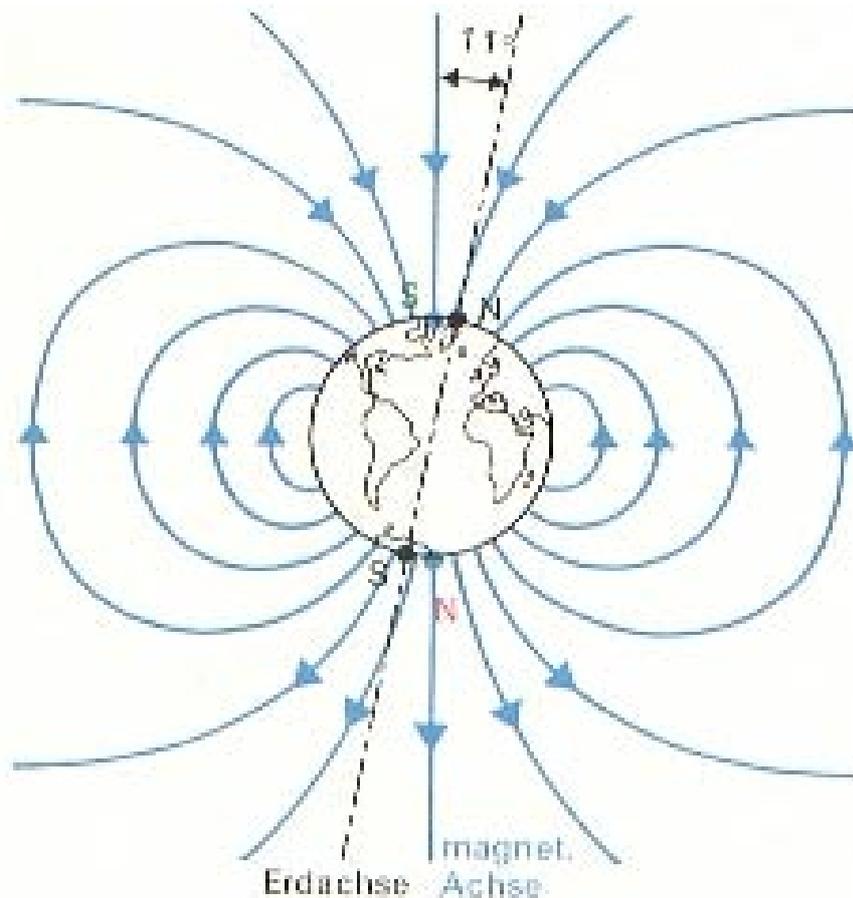
**Vorraussetzungen für die Entwicklung von Leben:**

- **Sonnensystem mit Planeten.**
- **Schwerere Elemente: Grundbausteine des Lebens**
- **Fehlen von kosmischen Katastrophen (Sternexplosionen, Zusammenstöße)**



## Energiebilanz der Biosphäre

- **Optimale Temperatur 10<sup>0</sup>C bis 40<sup>0</sup> Celsius**  
entsprechend 1/40 ( $\pm 5\%$ ) Elektronen-Volt
  - Wasser muss in flüssiger Form vorliegen
  - Eiweiße dürfen nicht gerinnen
- **Strahlung der Sonne als Treibstoff des Lebens**
  - Oberfläche strahlt mit 5000<sup>0</sup>C  
entsprechend 1/2 Elektronen-Volt
  - Sonneninnere (20 Millionen <sup>0</sup>C) ist abgeschirmt
  - Photosynthese -- Motor des Lebens
  - Sonnenstrahlen weitgehend unschädlich



## Schutzmechanismen der Erde gegen hoch-energetische Teilchen und Strahlung

- Das Erd-Magnetfeld zum Einfang von hoch-energetischen geladenen Teilchen (Höhenstrahlung)
- Die Luftschicht als Abschirmung
- Die Ozon-Schicht als Schirm gegen ultraviolette Strahlung von der Sonne

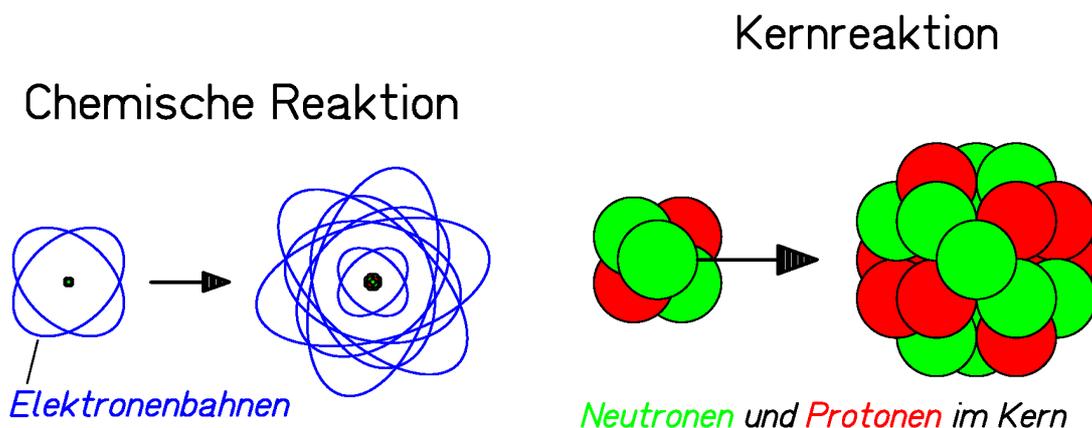


## **Nutzung von fossiler Energie (Kohle, Erdöl, Erdgas)**

- **Durch Photosynthese gespeicherte Sonnenenergie**
- **Verbrennen als chemische Reaktion (z. B.  $C + 2 \times O \rightarrow CO_2$ ) – Energieumsetzung im Bereich von Elektronen-Volt.**
- **Strahlung als sichtbares Licht (um  $1000^{\circ} C$ ) ist ungefährlich.**
- **Indirekter Einfluss auf die Energiebilanz der Erde durch den Treibhaus-Effekt**

Technische Nutzung der Kernenergie in Kernreaktoren beruht auf Kernreaktionen  
(Ein mächtiges Werkzeug → Der Mensch als Zauberlehrling?)

## Chemische Reaktionen gegen Kernreaktionen – Grundsätzlicher Unterschied



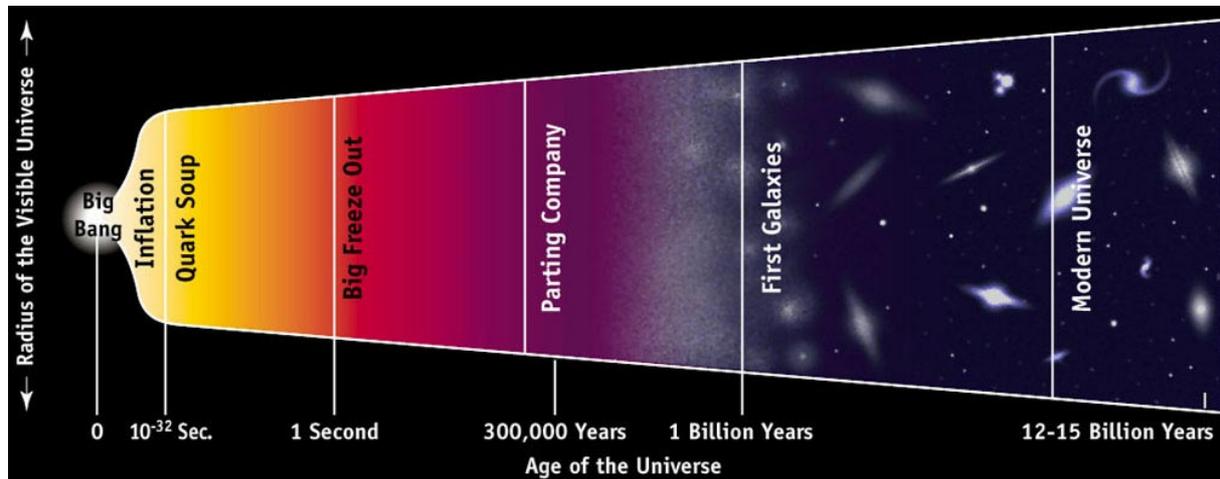
### Chemische Reaktionen

- Umordnungen von Atomen zu verschiedenen Molekülen.
- Energiegewinn oder -zufuhr durch elektrische Wechselwirkung der Hüllen-Elektronen.
- Typische Energien: wenige Elektronen-Volt.

### Kern-Reaktionen

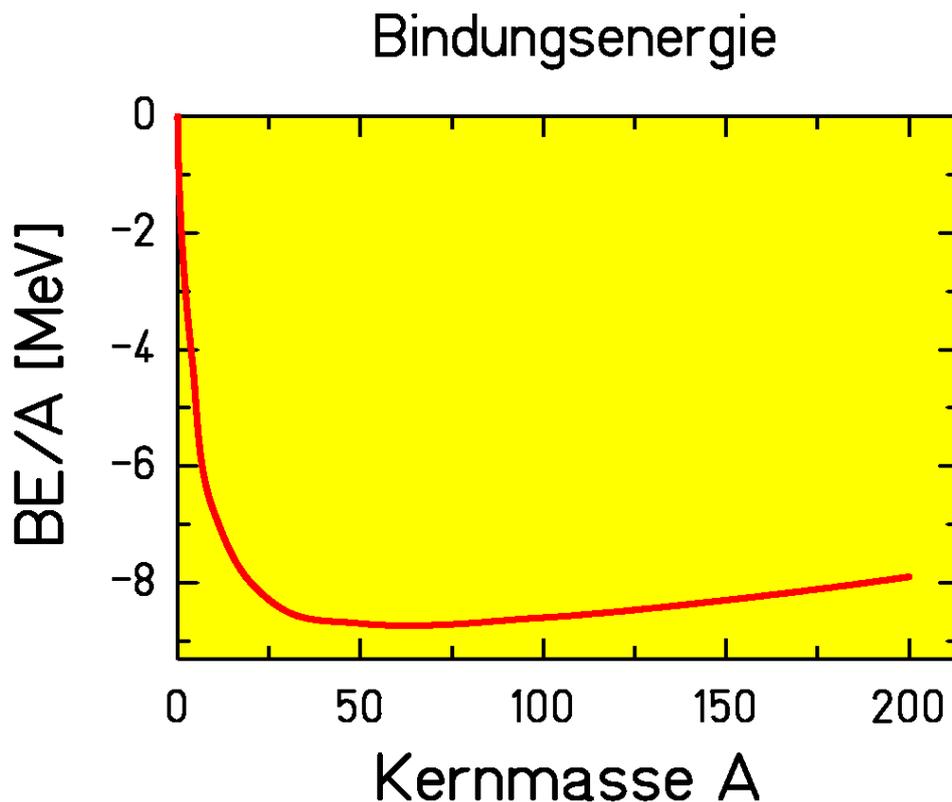
- Umordnungen von Protonen und Neutronen zu verschiedenen Elementen und Isotopen.
- Energiegewinn oder -zufuhr durch starke Wechselwirkung der Protonen und Neutronen im Kern.
- Typische Energien: einige Millionen Elektronen-Volt.

Entscheidende Prozesse im Weltraum sind verbunden mit *Kernumwandlungen*:



## Ursprung der Materie – der Urknall

Der Urknall vor etwa 15 Milliarden Jahren hinterließ im Wesentlichen *Wasserstoff* (1 Proton) und Helium (2 Protonen und 2 Neutronen) (3 Minuten nach Beginn des Universums).



## Energiebetrachtung von Kernen, die besondere Rolle von Eisen

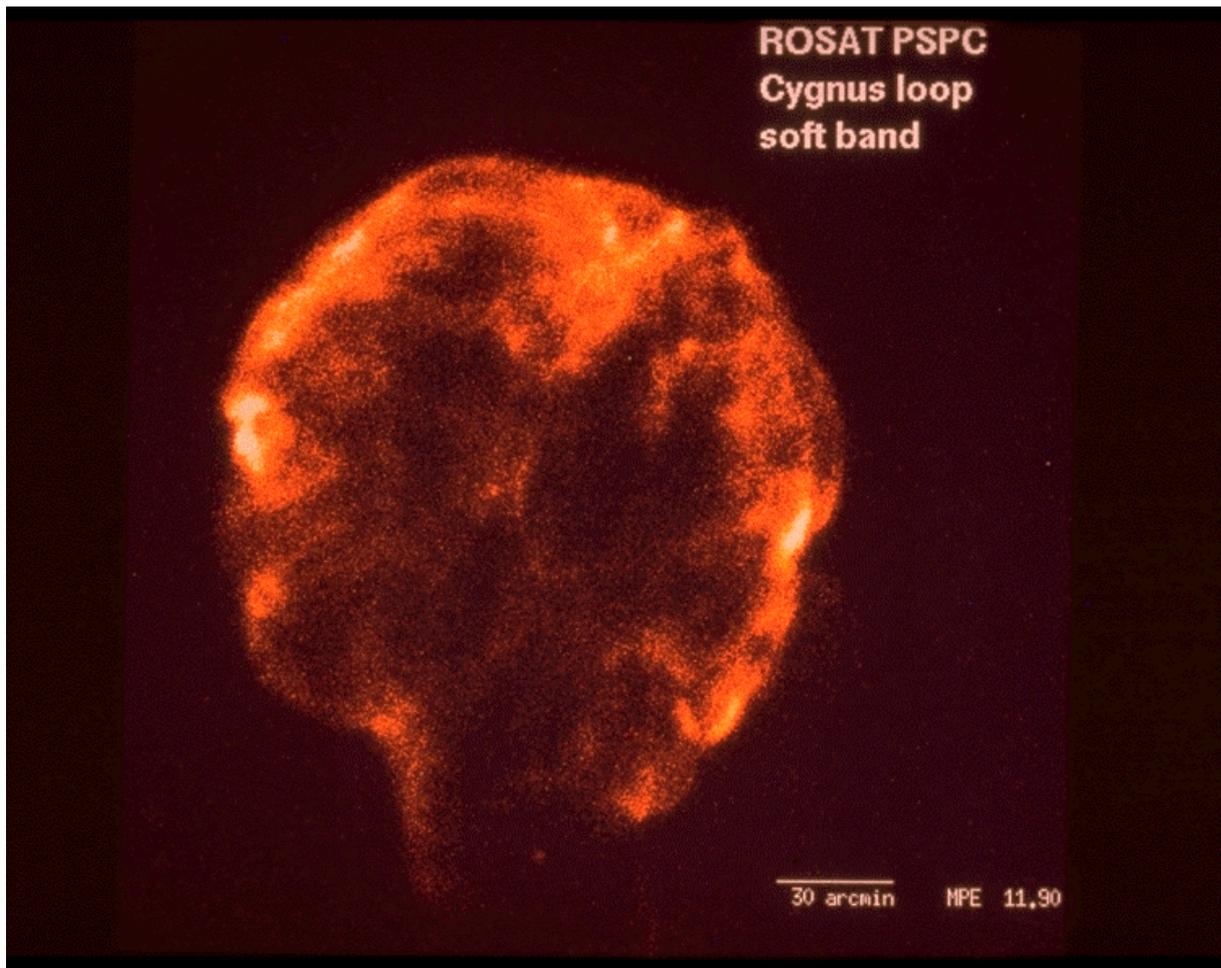
- Einzelne Protonen sind „Brennstoff“.
- Durch Zusammenfügen von Protonen zu größeren Kernen wird Energie frei, bis man Eisen (26 Protonen, Masse  $A = 56$ ) erreicht.
- Schwerere Kerne sind wieder weniger gebunden.



**Aufnahme des Orion Nebels, eine mögliche Geburtsstätte von Sternen.**

## **Die erste Sternengeneration, Bildung der Kerne bis zum Eisen**

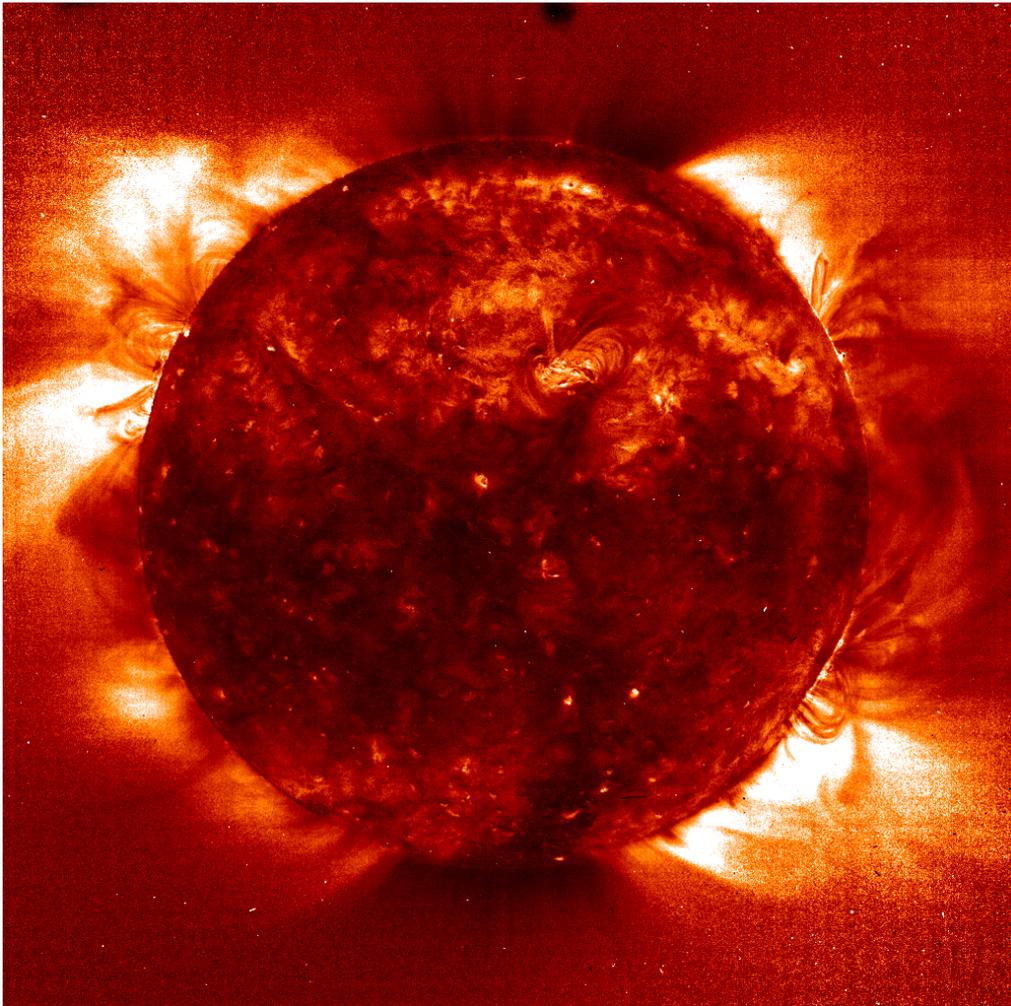
- **Gaswolken verdichteten zu Sternen**
- **Sterne verbrennen schrittweise Wasserstoff zu Eisen (= Asche der nuklearen Verbrennung.)**
- **Kontrollierte technische Nutzung im Fusionsreaktor noch nicht gelungen.**



Die Überreste einer Supernova

## Das Ende eines Sternes, Bildung der schwersten Elemente

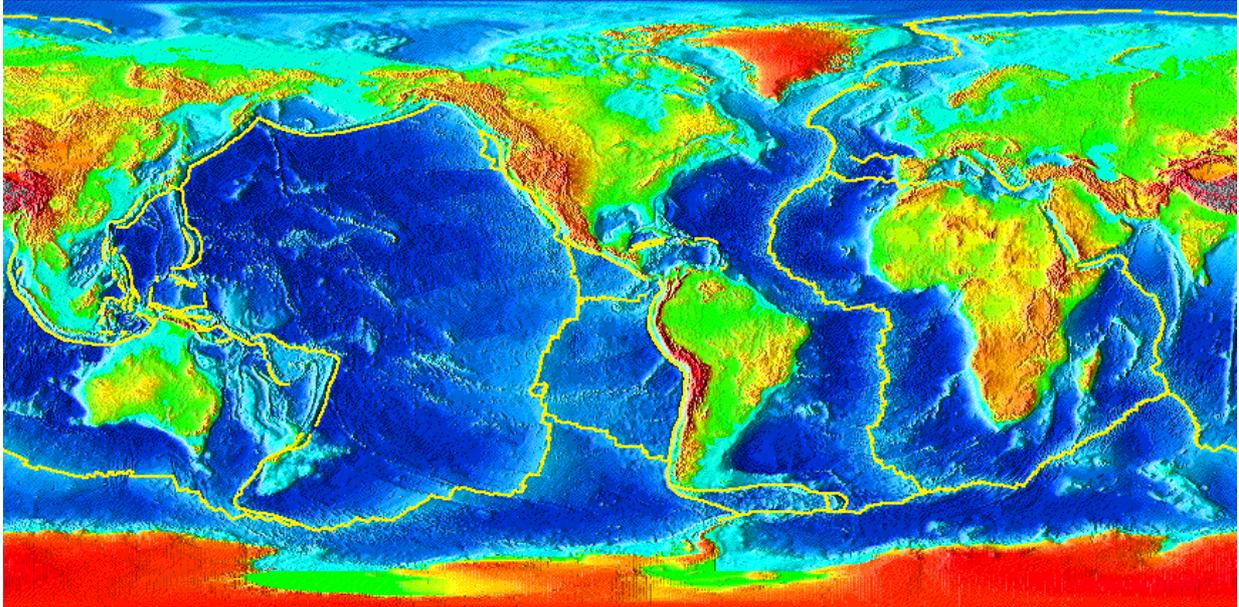
- Nach Ausbrennen kollabiert der Stern (evtl. Supernova).
- Ein Teil der Kerne zerbricht in einzelne Protonen und Neutronen.
- Einzelne Neutronen und Protonen lagern sich nach und nach an die Kerne an und bilden noch schwerere Kerne, bis über das Uran hinaus.
  - Die dabei entstehenden radioaktiven Kerne zerfallen wieder.
- Die schwersten Kerne sind wieder ein „Brennstoff“.



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

## **Das Sonnensystem**

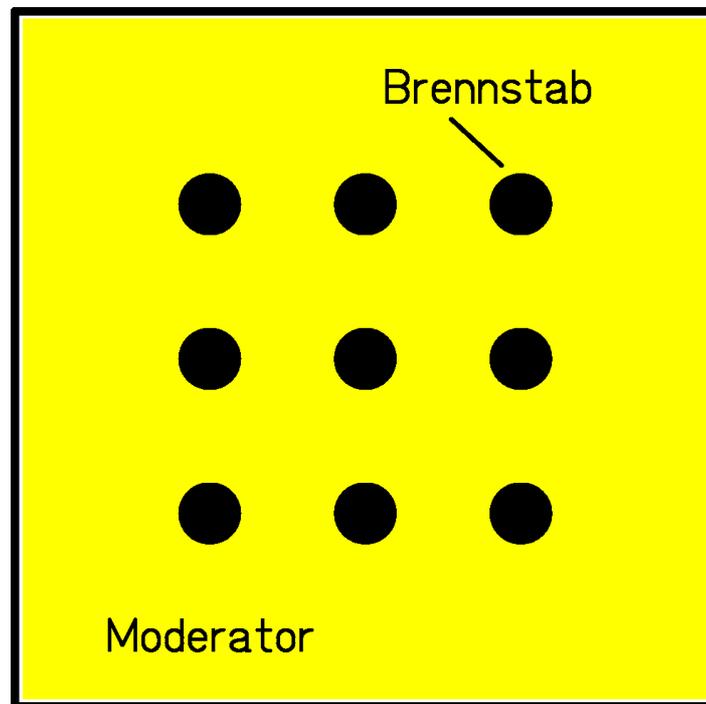
- **Rückstände früherer Supernovae bilden das Sonnensystem (vor 4.7 Milliarden Jahren).**
- **Alle „stabilen“ Elemente zwischen Wasserstoff (1 Proton) bis Uran (92 Protonen) enthalten.**
- **Die Sonne verbrennt schrittweise Wasserstoff zu Eisen.**
- **Die Erdanziehung kann nur schwere Elemente halten.**



Die Grenzen der Kontinentalplatten auf der Erde

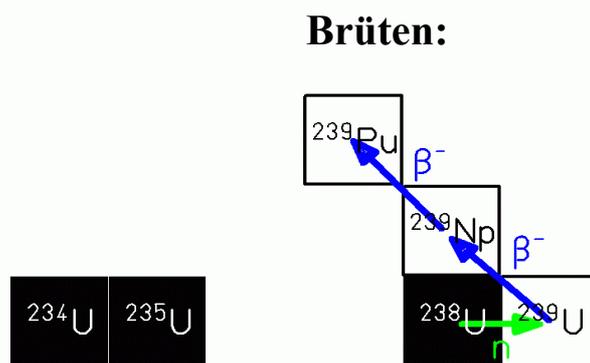
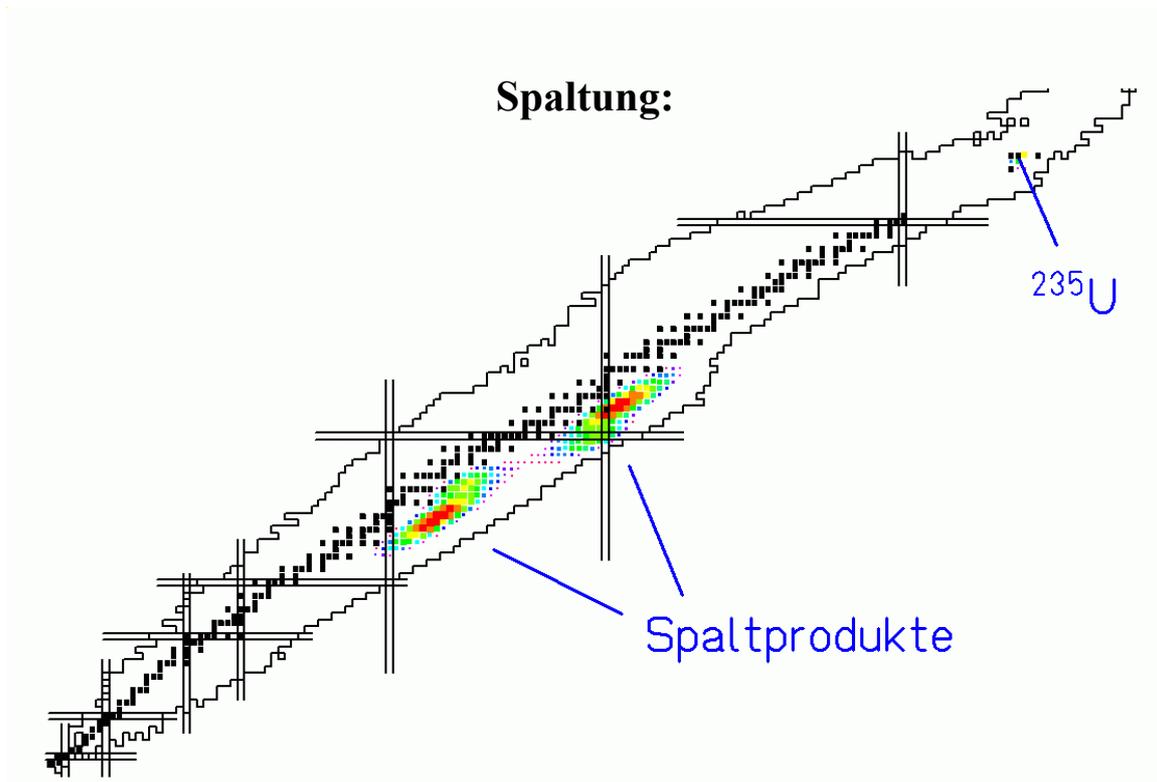
## Natürliche Radioaktivität der Erde

- Heizung im Erdinnern durch natürlichen Zerfall der schweren Kerne (Uran, Thorium)
  - Aussendung von Alpha-Teilchen (Helium-Kernen)
- Flüssiges Erdinnere wichtig für die *Plattentektonik*
  - Entstehung von Kontinenten, Trennung von Festland und Ozeanen.
- Die natürliche Radioaktivität im Erdinnern ist eine Grundvoraussetzung für die Lebensbedingungen auf der Erde.



## Spaltreaktoren

- Kontrollierte Spaltung von  $^{235}\text{U}$  durch Einfang von Neutronen.
- Nutzung der in den schwersten Elementen gespeicherten nuklearen Energie.



## Der radioaktive Abfall

- Bildung von radioaktiven Kernen durch Spaltung (Spaltprodukte) und Brüten (Aktinide).
- Vergiftung des Reaktors durch Wegfangen von Neutronen.
- Industrie zur Wiederaufbereitung von Kern-Brenn-Elementen hinterlässt größere Mengen von *radioaktivem Abfall*.

Menschheit in der Rolle des Zauberlehrlings?

## Bilanz der Reaktionsprodukte

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

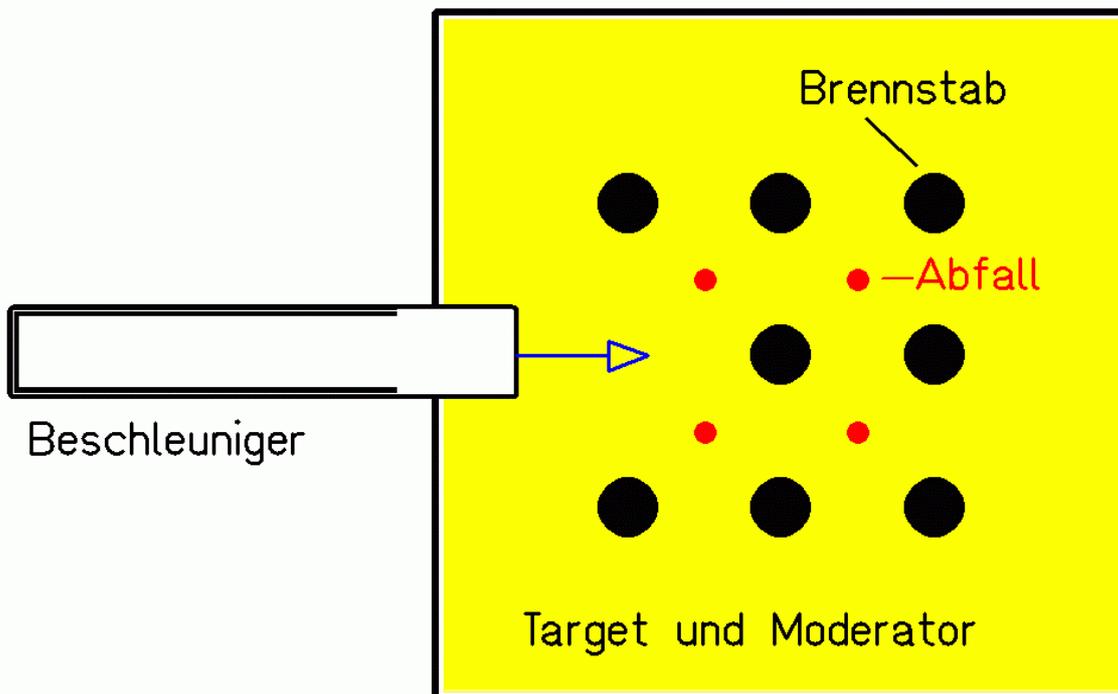
Isotop	Lebensdauer	900 MW, 1 Jahr
79Selen	70000 Jahre	0,1 kg
93Zirkon	1,5 Millionen Jahre	15,5kg
99Technetium	210000 Jahre	17,7 kg
107Palladium	6,5 Millionen Jahre	4,4 kg
126Zinn	10000 Jahre	0,44 kg
129Jod	15,7 Millionen Jahre	3,9 kg
135Cäsium	2 Millionen Jahre	7,7 kg

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

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

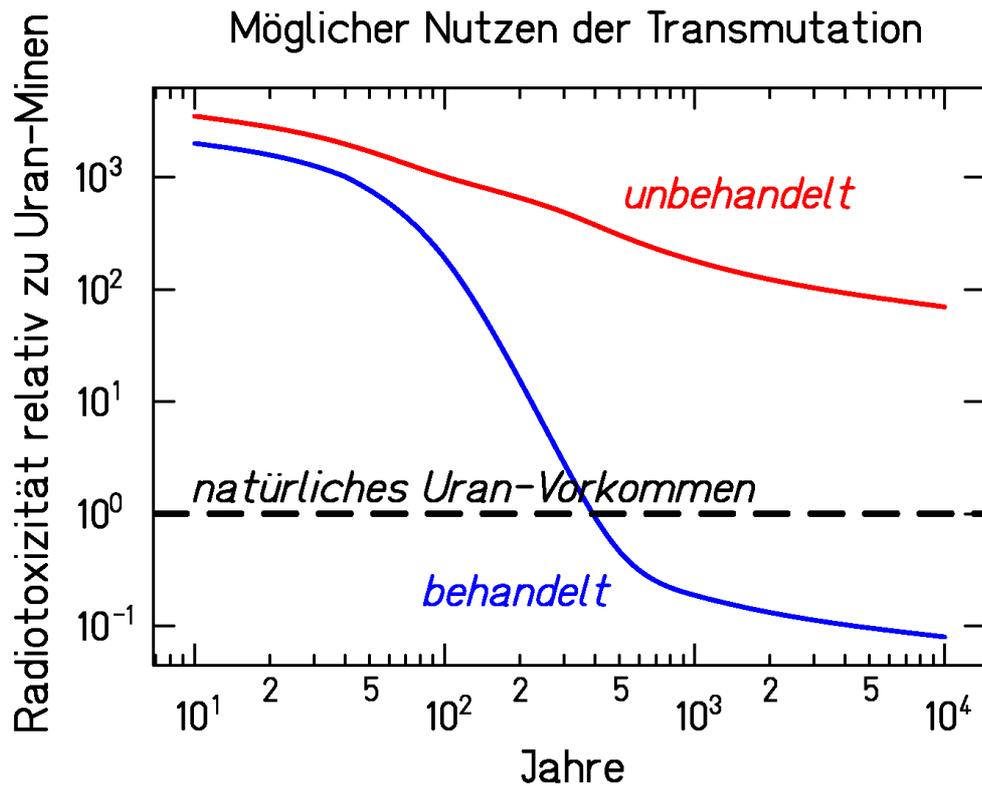
- **Andere erbrütete Aktiniden:**  
Viele nicht spaltbar mit thermischen Neutronen

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



## Ein Projekt zur Beseitigung des radioaktiven Abfalls: der Beschleuniger-getriebene Reaktor

- Idee von Bowman (Amerika) und Rubbia (Europa) für einen "intrinsisch sicheren" Reaktor.
- Der Hybridreaktor -> Neutronen werden von außen zugeführt, wie „Anblasen eines Grillfeuers mit einem Föhn“.
- Einführung eines Protonenstrahls (eventuell Deutronenstrahls) von 1 GeV aus einem Beschleuniger erzeugt zusätzliche Neutronen.
- Betrieb von „vergiftetem“ Reaktor möglich.
- Absichtliche Vergiftung mit radioaktivem Abfall
- Bei genauer Kenntnis der einzelnen Prozesse: Umwandlung von radioaktivem Abfall
- Keine Ablagerung, sondern Verwertung („Inzineration“) oder Beseitigung („Transmutation“).



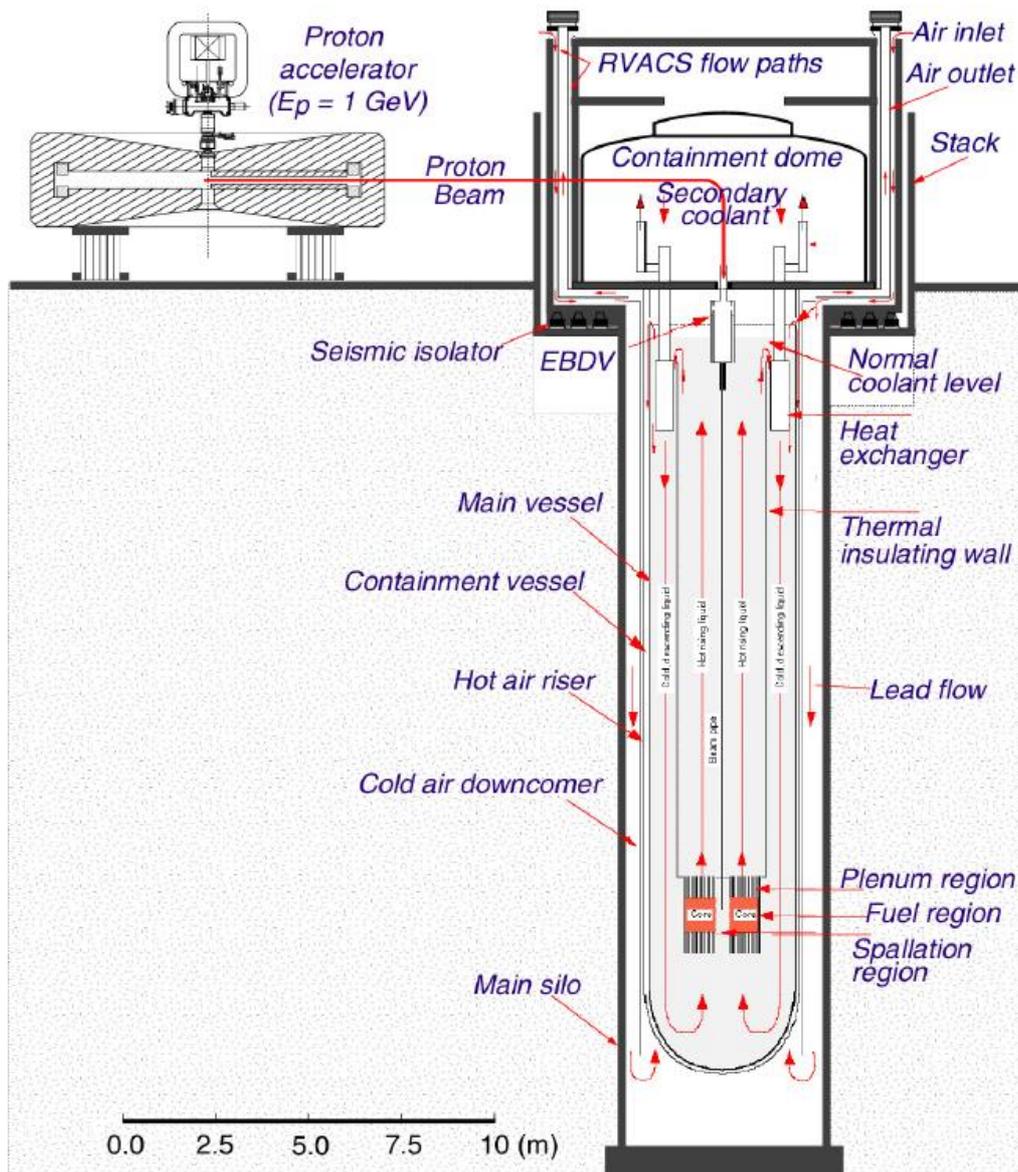
## Berechnung der Rest-Radioaktivität von radioaktivem Abfall (Ph. Fink, ANL)

**Nutzen der Transmutation:**

**Beaufsichtigte Lagerung zum Abklingen der Radioaktivität für wenige hundert Jahre**

**anstatt**

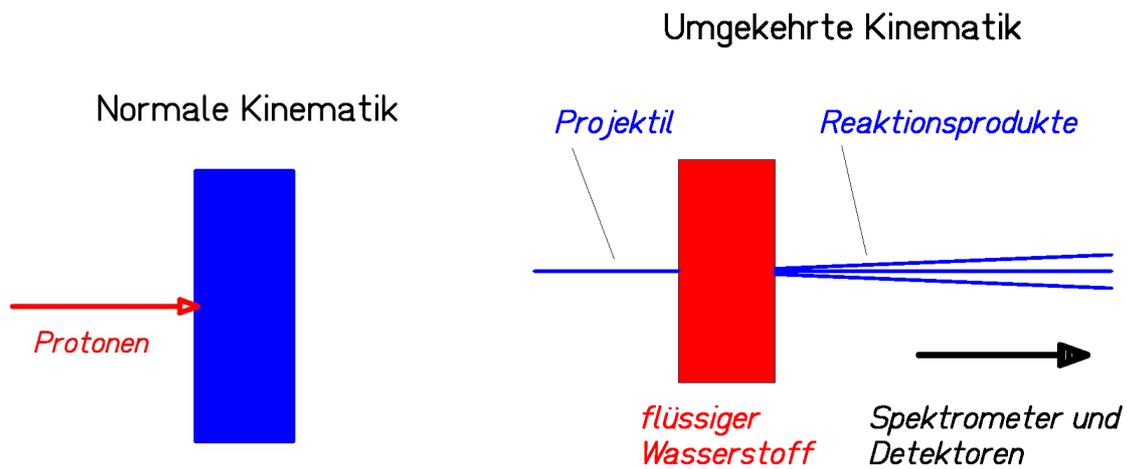
**unüberschaubar über Jahrtausende hinaus bestehende Gefahr durch Strahlung.**



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

Untersuchung der Kernzertrümmerung beim Einschuss der Protonen in den Reaktor:

- Neutronenausbeute
- Zerstörung der Baustoffe durch Strahlung
- Erzeugung chemisch aggressiver Substanzen
- Notwendige Abschirmung gegen Radioaktivität
- Aufbau ungewollter Langzeitradioaktivität



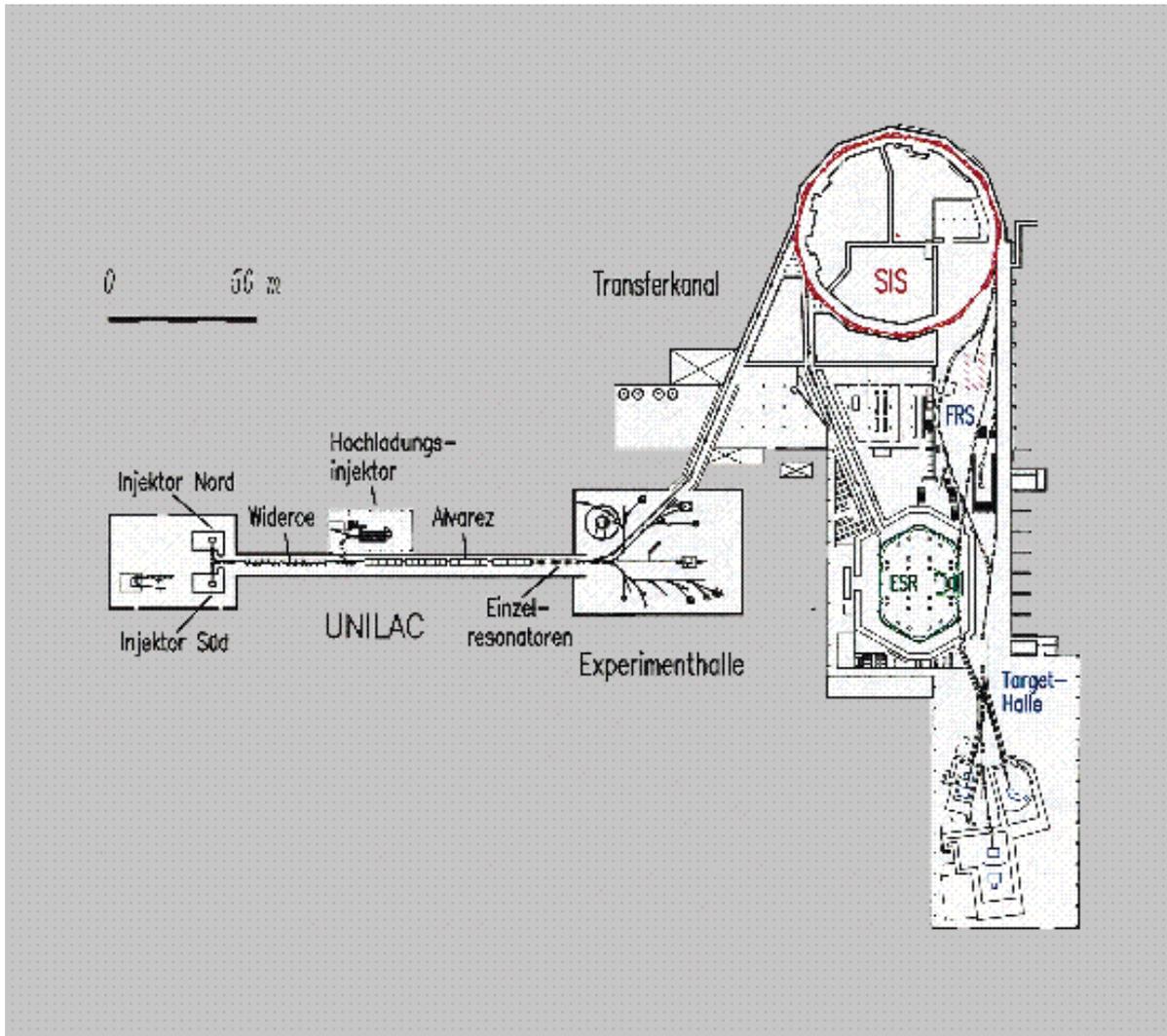
## Der Vorteil von Experimenten in umgekehrter Kinematik

**Bisherigen Experimente: Einschuss von Protonen in einen Block Materie**

- Reaktionsprodukte bleiben stecken.
- Versuch zur Identifizierung nach Protonenbeschuss anhand der Radioaktivität
- Keine Information über stabile und sehr kurzlebige Kerne.
- Kein hinreichendes Verständnis der Physik der Spallation möglich.

**GSI: Einzelne schwere Ionen werden beschleunigt und wechselwirken mit Protonen in einem Wasserstofftarget.**

- Die gleiche Physik, aber Untersuchung der Produkte im Fluge möglich (Fragmentseparator, ALADIN).

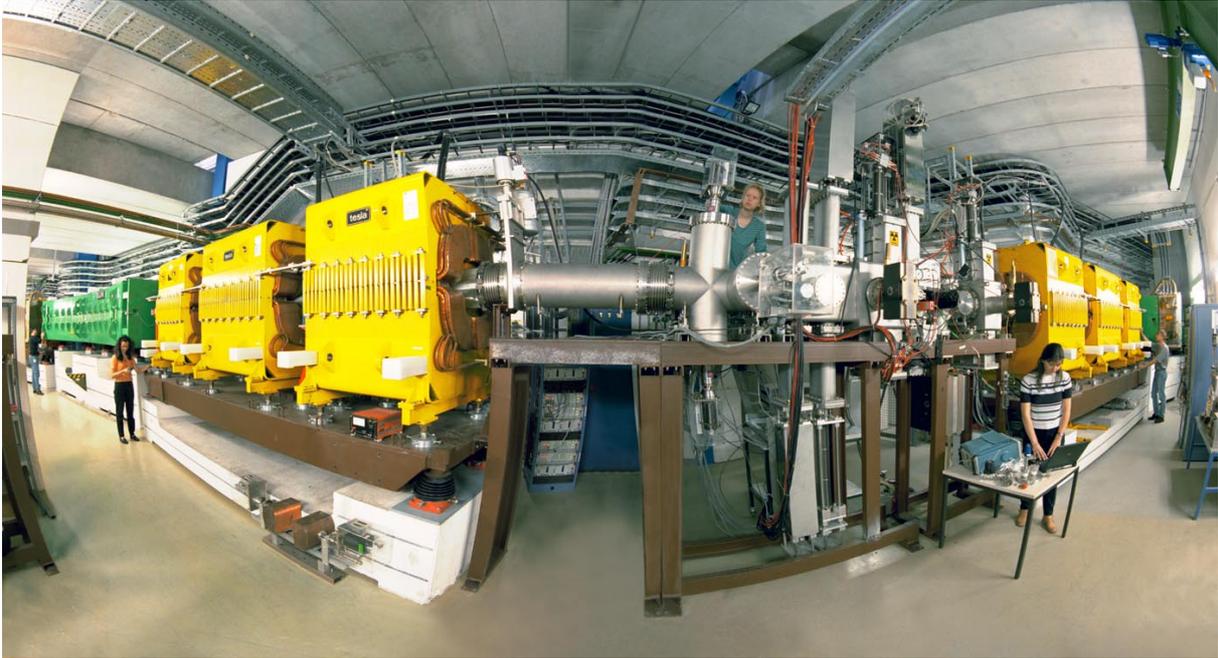


## Vereinte Anstrengung europäischer Partner

### Zusammenschluss europäischer Institute:

- GSI: *Beschleunigeranlage, Spektrometer. Inzinerationsgruppe: P. Armbruster (Anstoß 1996), D. Henzlova, V. Henzl, A. Kelic, P. Napolitani, M. V. Ricciardi, O. Yordanov, K.-H. Schmidt.*
- CEA Saclay: *flüssiges Wasserstofftarget, Experimente, Auswertung.*
- IPN Orsay und Universität Santiago de Compostela: *Experimenten und der Auswertung.*

Teil des *europäischen Forschungsprogramms HINDAS*, unterstützt von der Europäischen Union.



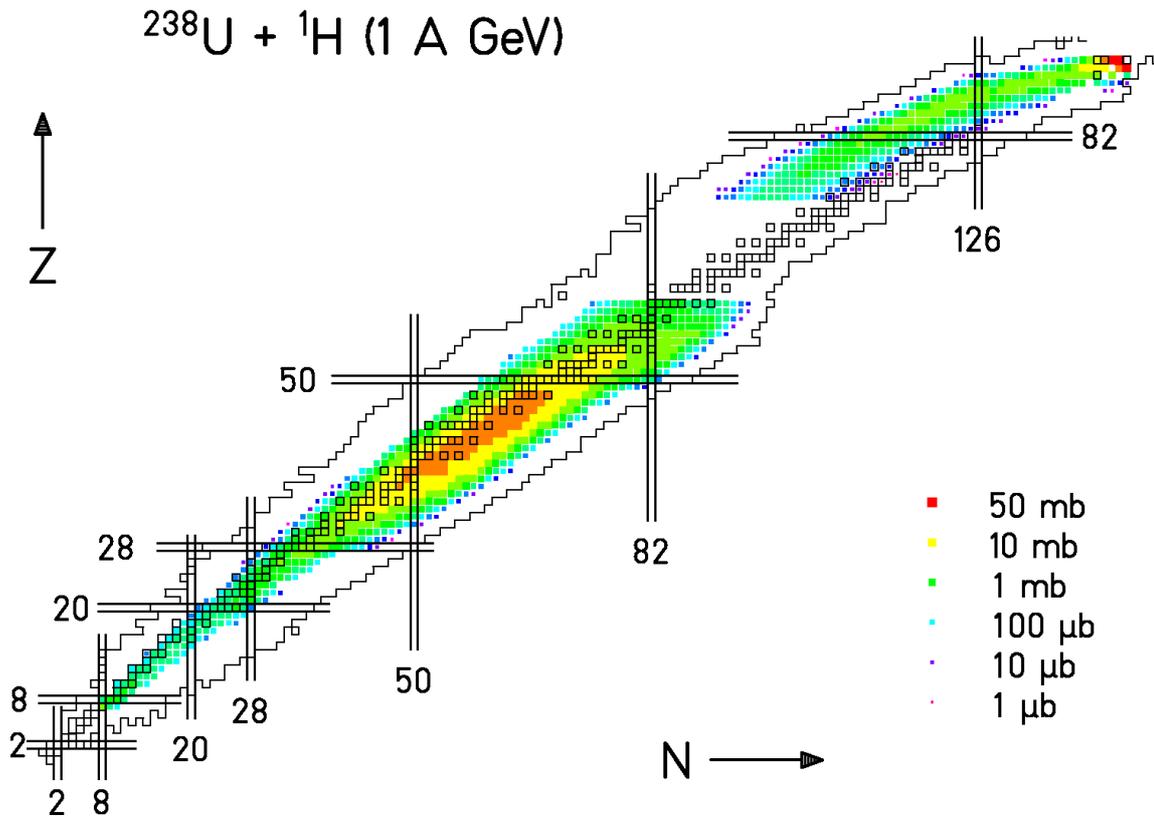
## **Der Fragmentseparator**

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

**Technischer Betrieb durch**

- **Karl-Heinz Behr**
- **Karlheinz Burkard**
- **Adolf Brünle**

## Gemessene Produktionsquerschnitte



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

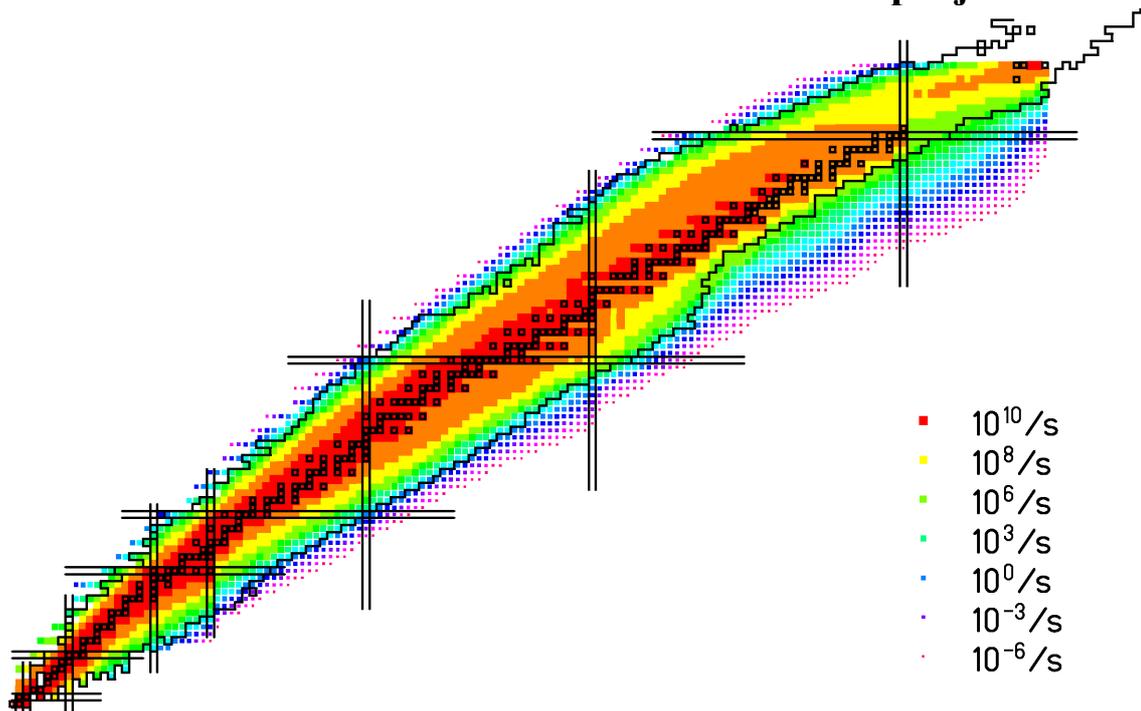
## Bisherige Ergebnisse

- **Komplette Nuklidverteilung (etwa 4000 Datenpunkte, bisher 7 Veröffentlichungen)**
  - Gold + Protonen
  - Blei + Protonen oder Deuteronen,
  - Uran + Protonen oder Deuteronen
  - Uran + Blei
- **Energieverteilung jedes einzelnen Nuklids**

Wesentlich verbesserte Basis-Daten für die Abschätzung von chemisch aggressiven Substanzen, Strahlenschäden, Abschirmung gegen Radioaktivität, ungewollte Langzeitradioaktivität etc..

(→ Wird verbesserte Planung des H.R. erlauben.)

## Berechnete Strahlintensitäten für des GSI Zukunftsprojekt



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

- Realistische Abschätzung der im Zukunftsprojekt der GSI erreichbaren Intensitäten exotischer Kerne möglich.
- Eingeflossen in den „Conceptual Design Report“
- Auch andere Sekundärstrahl-Projekte, wie EURISOL (die Planung einer zukünftigen europäischen ISOL-Anlage) profitieren von den neuen Erkenntnissen.

## Bedeutung für die Grundlagenforschung (u. a.)

- Wechselwirkung der Nukleonen im Kern
- Stabilität von hochangeregten Kernen
- Zähigkeit der Kernmaterie
- Dynamische Effekte der Kernstruktur

## Zusammenfassung

- Nutzung der Kernenergie begann ohne Lösung des Abfallproblems.
- Grundlagenforschung der GSI trägt bei zum verantwortungsvollen Umgang mit den angefallenen radioaktiven Stoffen.
  - (Zähmung der vom „Zauberlehrling“ Mensch freigesetzten Gewalten?)
- Vielleicht eine neue Chance für die Kernenergie als mögliche Antwort auf den Treibhaus-Effekt bei entsprechendem Bedarf.