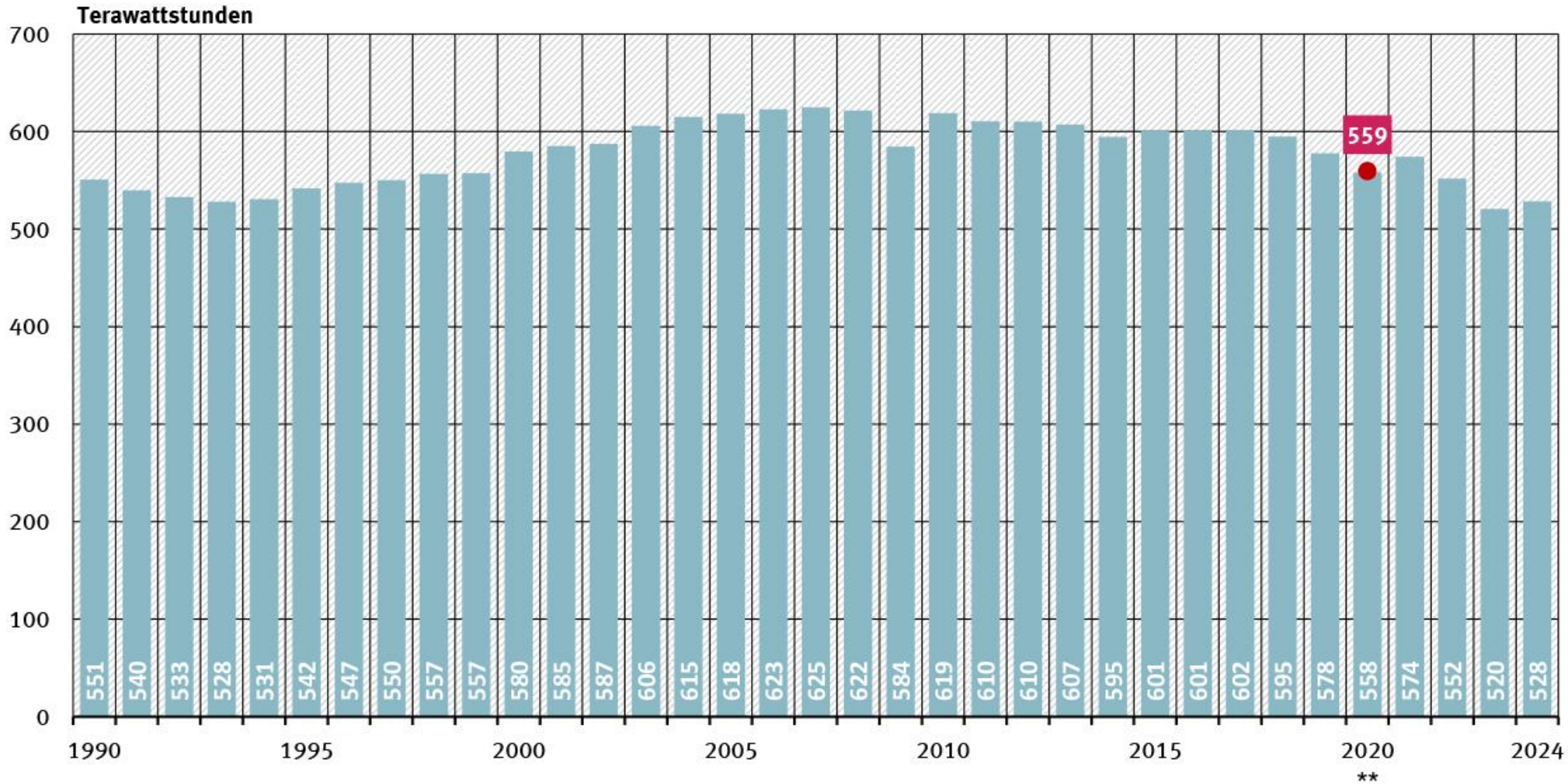
Ringvorlesung Fusionsenergie und ihre Rechtsfragen

Physikalische Aspekte
und Folgerungen für den sicheren Betrieb von Fusionskraftwerken

Karl Mannheim

Bruttostromverbrauch*

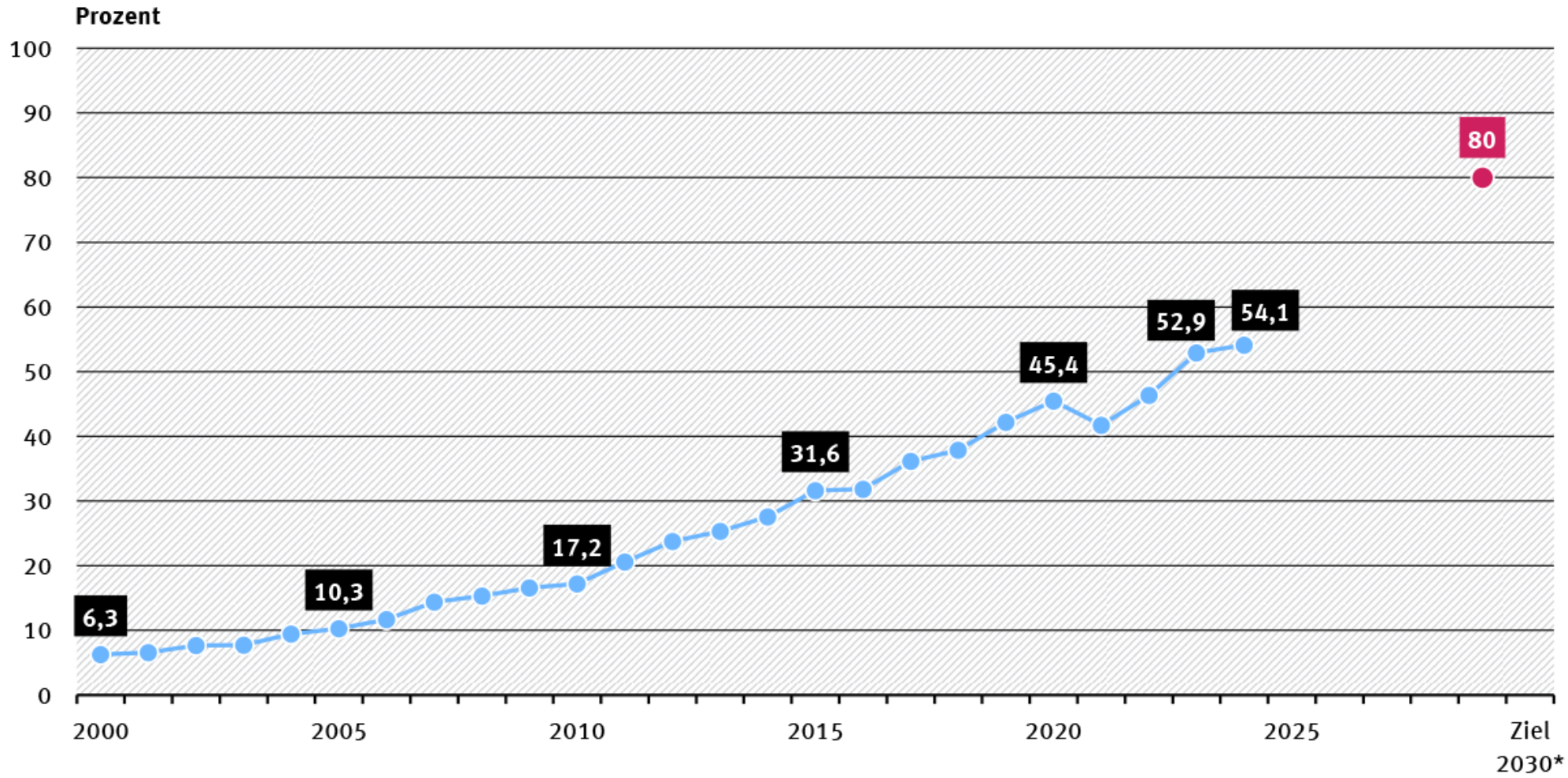


* einschließlich Pumpstromerzeugung, Netzverlusten, Eigenverbrauch und Stromhandelssaldo

** Ziel 2020: Energiekonzept der Bundesregierung 2010: Senkung des Bruttostromverbrauchs um 10 % gegenüber 2008

Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen: Tabelle "Stromerzeugung nach Energieträgern" (Stand 09/2025)

Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch



* Quelle Zielwert 2030: Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) 2023

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis UBA, AGEE-Stat: "Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland" (Stand 09/2025)

Prognose Strombedarf global:

- Wachsender Strombedarf durch Elektrifizierung
- Hohe Effizienzgewinne
- Steigender Anteil an erneuerbaren Energien: Wind, Sonne, Wasser, Geothermie, Biomasse
- Korrelation Strombedarf und BIP-Wachstum (IAE)
- KI-Datenzentren

Kernfusion:

- Inhärent sicher
- Keine langlebigen radioaktiven Abfälle
- Resilienz (Naturkatastrophen, geopolitische Krisen)
- Keine gravierende Rohstoffproblematik, aber kernchemische Aufbereitung erforderlich
- Globaler Wachstumsmarkt für Exportnation
- Treiber für Spill-Over Technologien
- Keine direkten Treibhausgasemissionen
- Gute Wettbewerbsposition Deutschlands für industrielle Verwertung

2010: Ausbruch des Vulkans am Eyjafjallajökull -Gletscher (Foto: dpa)

Ohne Kernfusion

- wäre es dunkel im Universum
- gäbe nur Wasserstoff-Atome

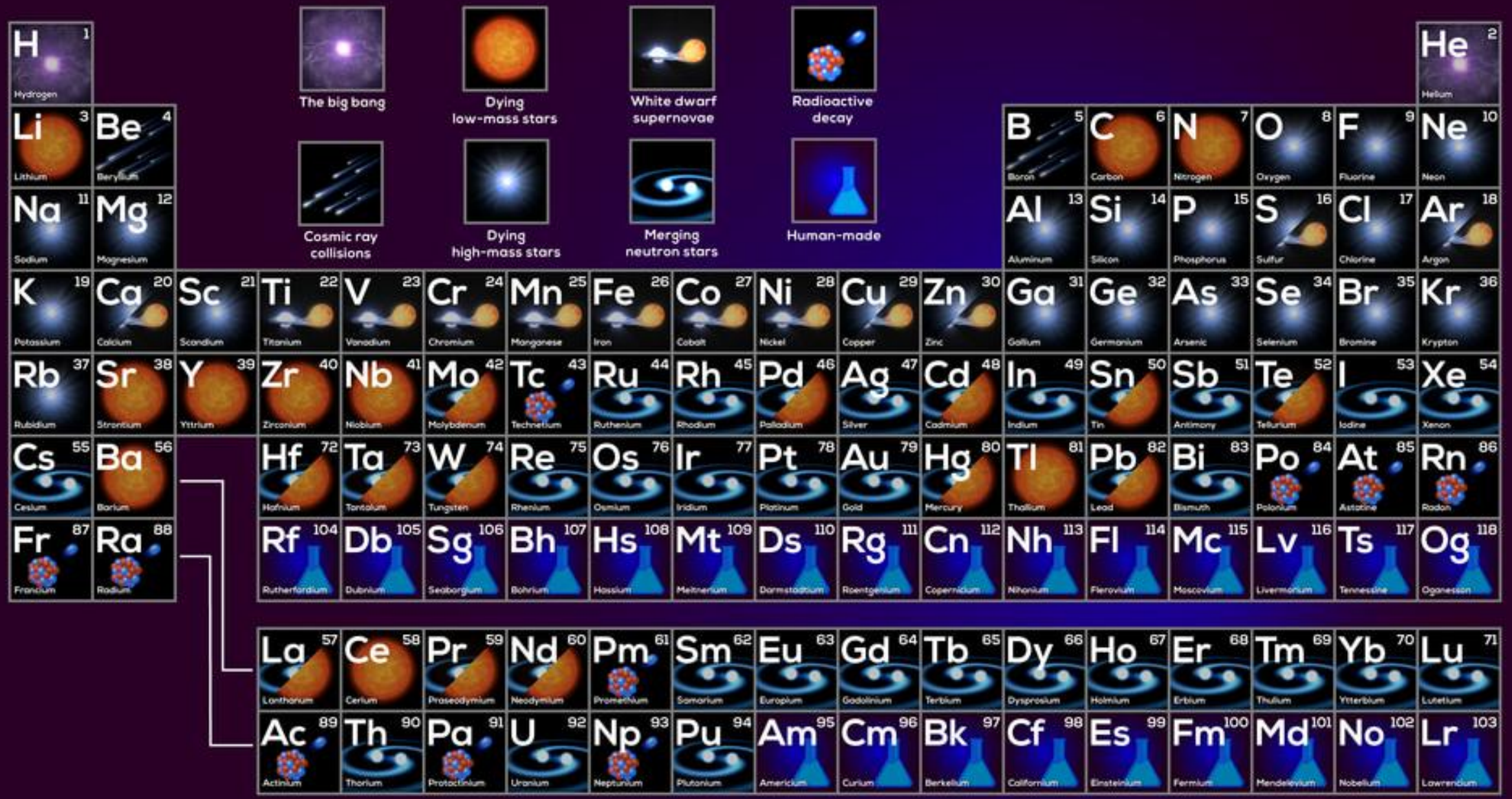
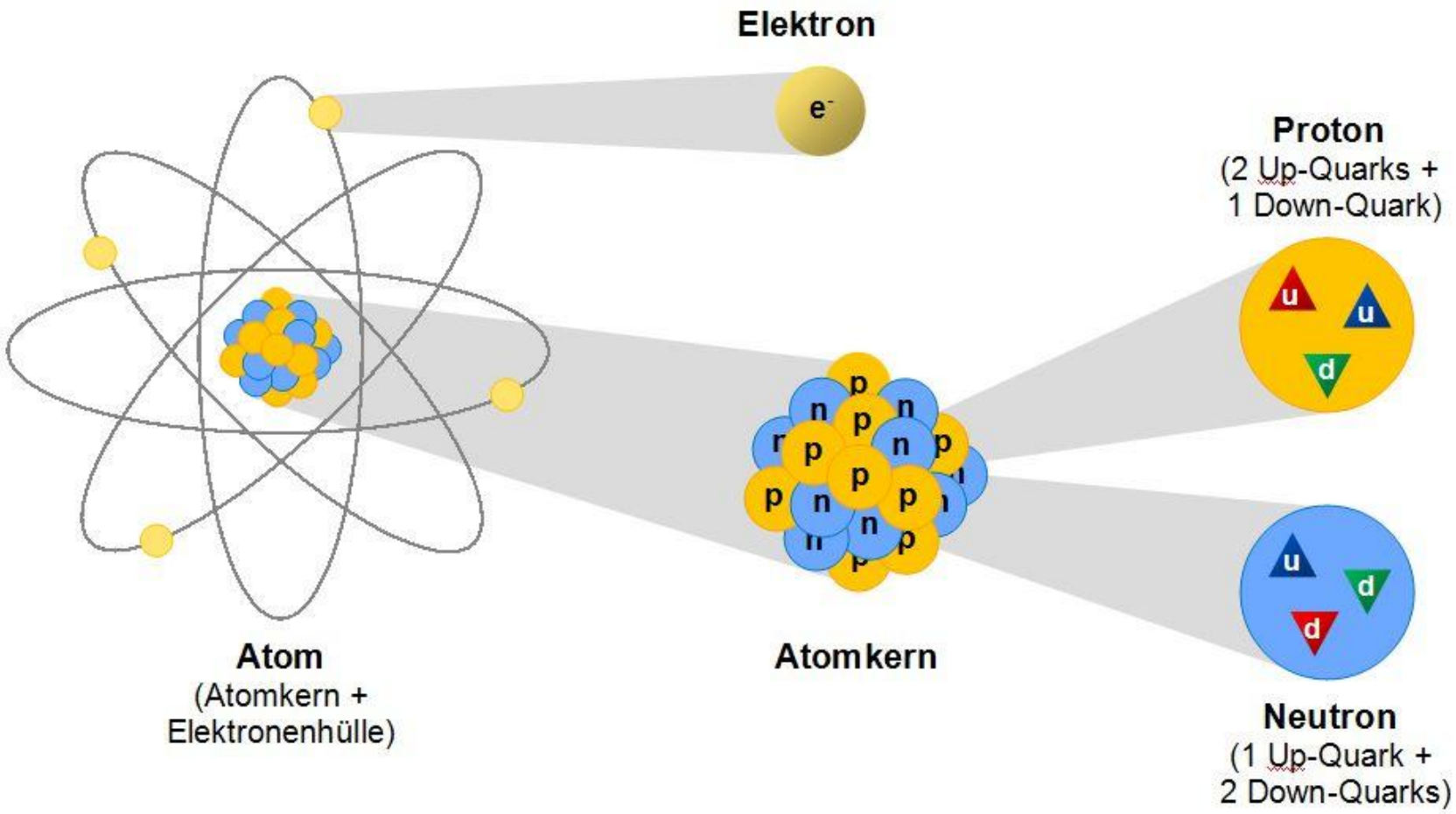


Image: NASA Goddard Space Flight Center

Die beiden MAGIC-Teleskope auf La Palma
(Foto: Urs Leutenegger/Night Photography)

Aufbau der Materie



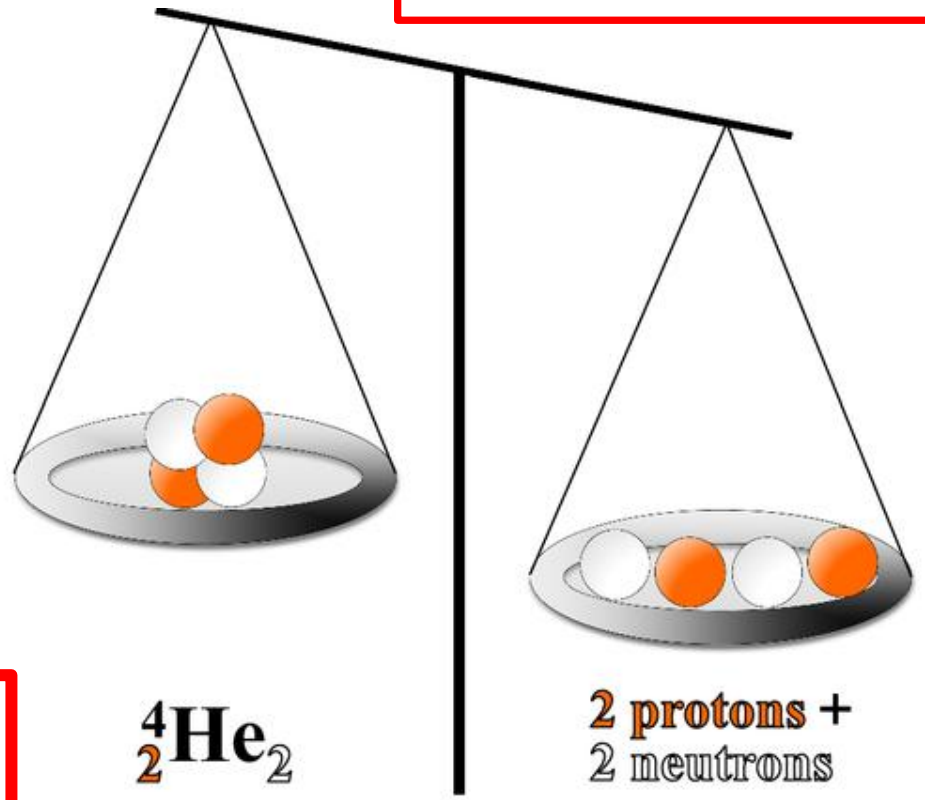
Typische Skala ~ 10^{-10}m **~10^{-14}m**

Massendefekt

Je größer der Massendefekt, desto höher wird die Stabilität der Kerne

$^{4}_{2}He_{2}$

	masses in u		
	nucleons	nucleus	mass defect Δm
protons	2 x 1.00728		
neutrons	2 x 1.00867		
	4.03188	4.00260	0.02928



$^{4}_{2}He_{2}$

= 4.00260 u

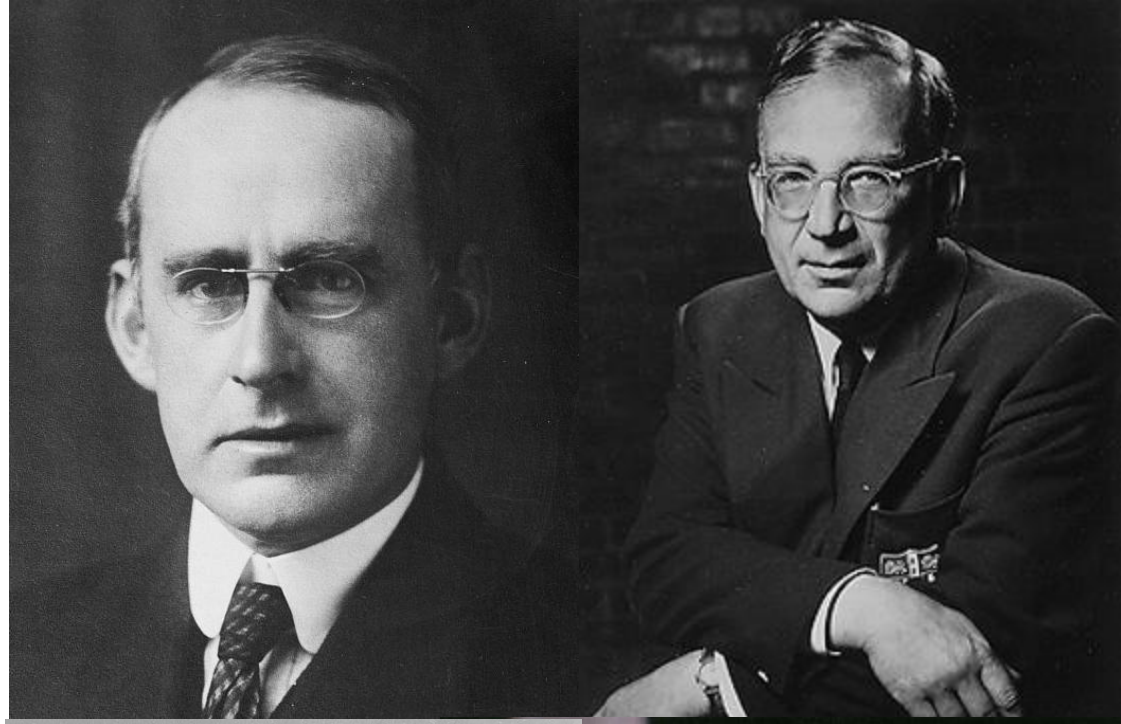
2 protons +
2 neutrons

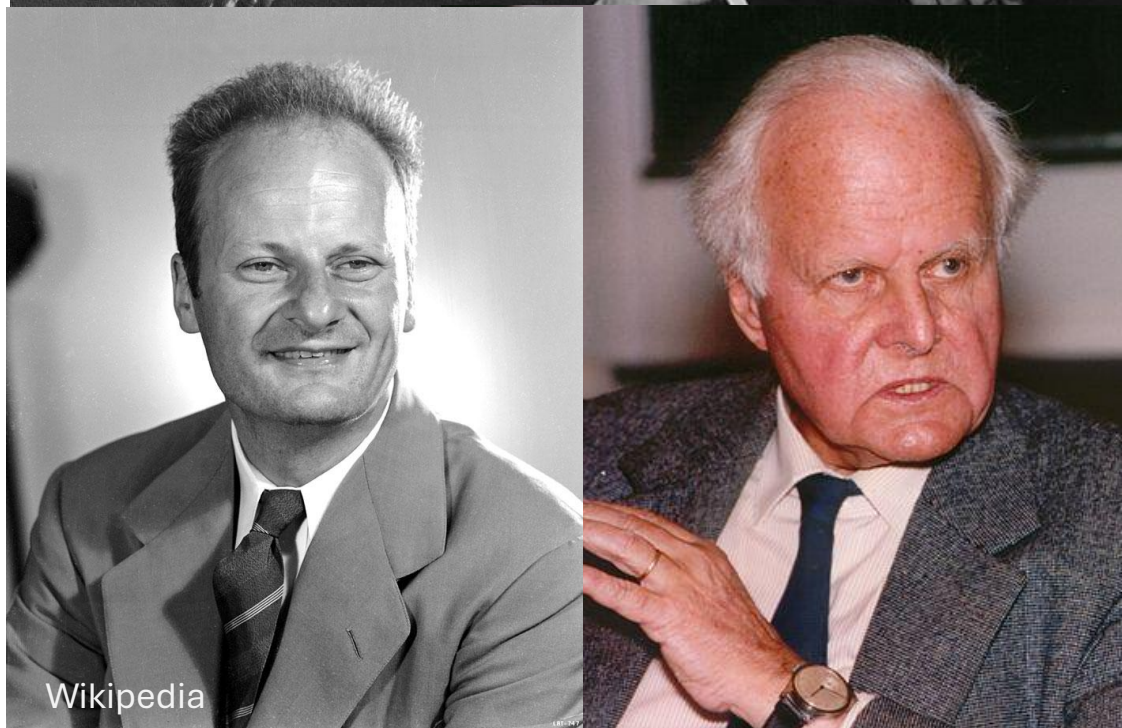
= 4.03188 u

In der Sonne werden 600 Mt Wasserstoff werden pro Sekunde zu 596 Mt Helium fusioniert und durch die Freisetzung des Massendefekts die Sonnenleuchtkraft von $3{,}8 \times 10^{26}$ W erzeugt

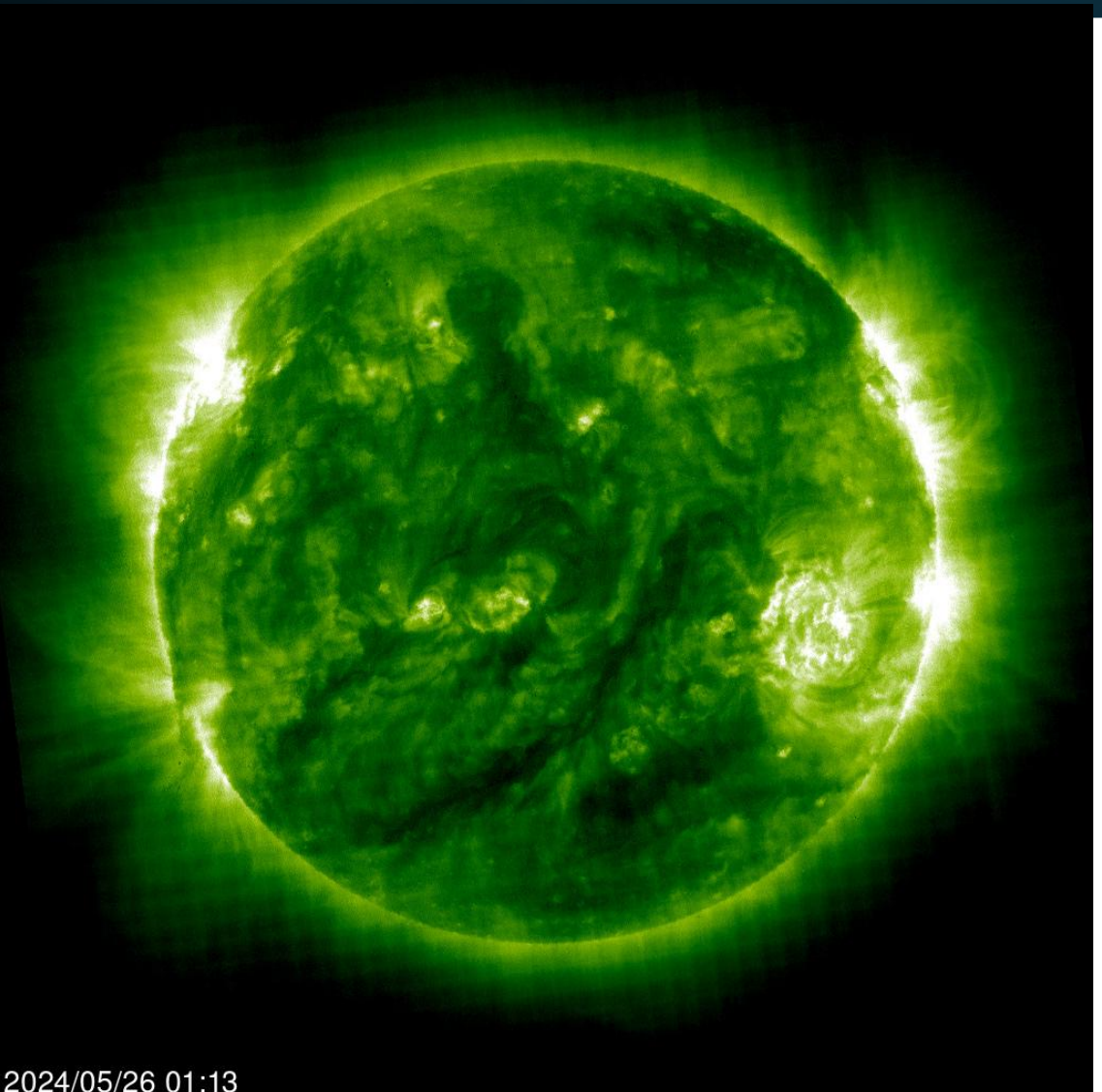
Astrophysik und Kernfusion

- 1920 Sir Arthur **Eddington**:
  Fusion von Wasserstoff zu Helium als Energiequelle der Sterne
- 1928 George **Gamov**:
  Tunneleffekt zur Überwindung der Coulomb-Barriere
- 1937-1939: Carl-Friedrich von **Weizsäcker**/Hans **Bethe**:
  pp- und CNO-Zyklus der Wasserstoff-Kernfusion in Sternen (Nobelpreis 1967)
- 1948: Ralph Alpher, George **Gamov**, Hans Bethe:
  Urknall-Nukleosynthese der leichten chemischen Elemente



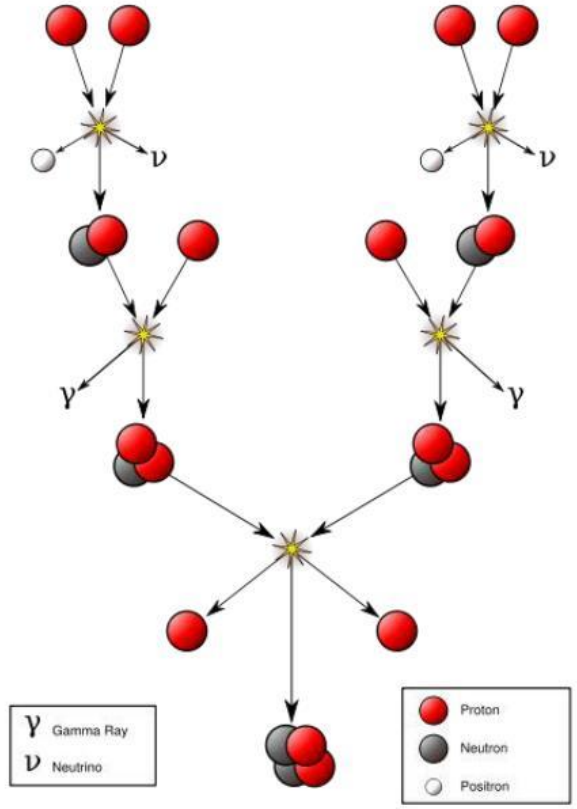


Kernfusion in der Sternen (Eddington 1920)

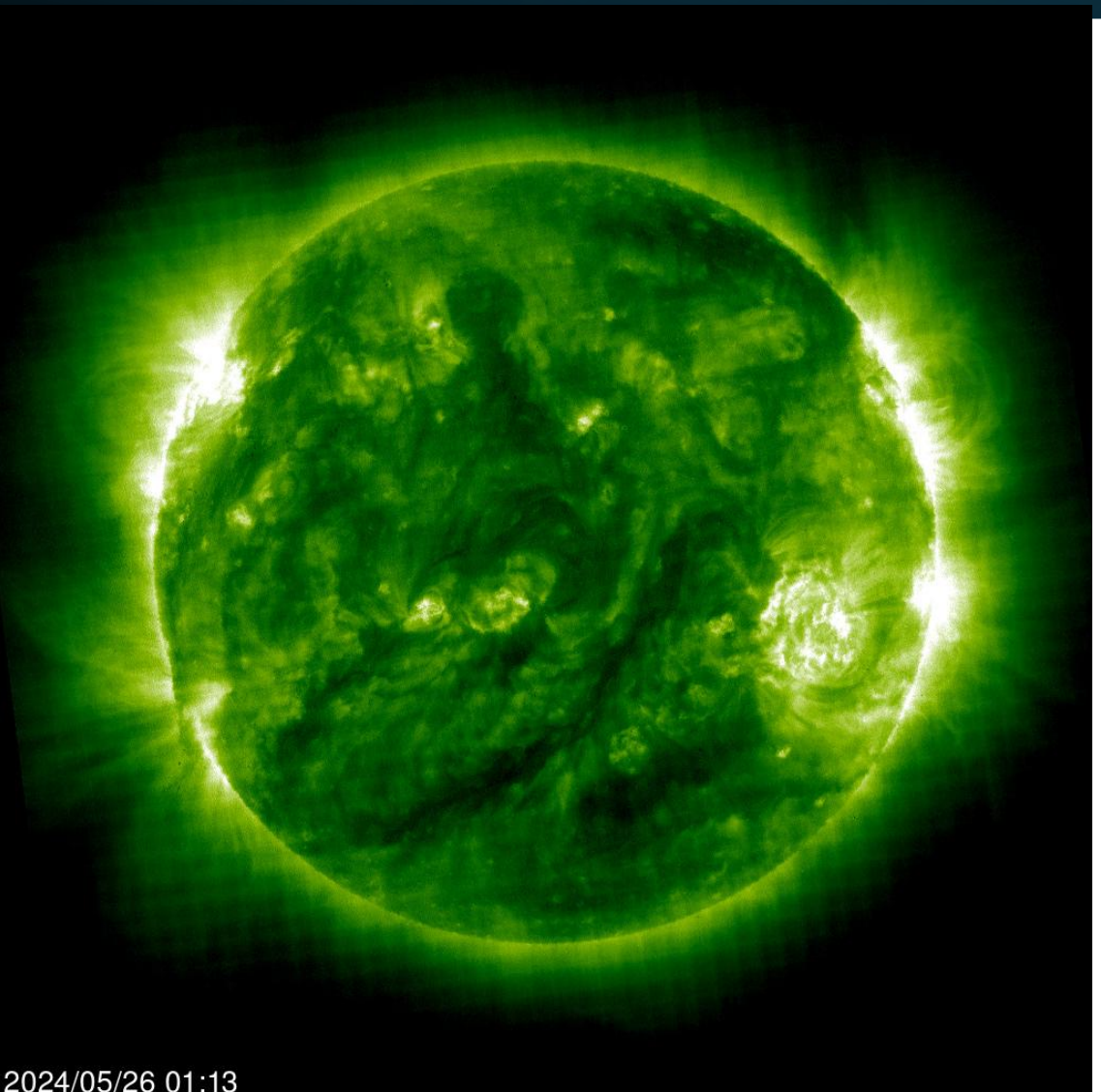


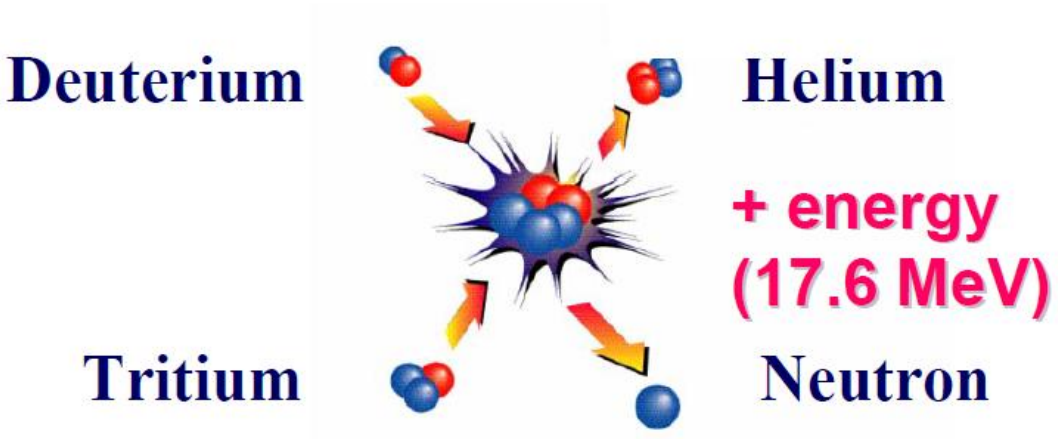
Proton-Proton-Fusion

- Coulomb-Barriere
- Quantenmechanisches Tunneln (Gamov 1928)
- Hohe Temperatur und Dichte des Plasmas
- Einschluß durch Gravitation
- Bethe & von Weizsäcker (1937-1939)



Deuterium-Tritium Kernfusion





Kinetische Energie verteilt sich auf:

Neutronen mit 14.1 MeV

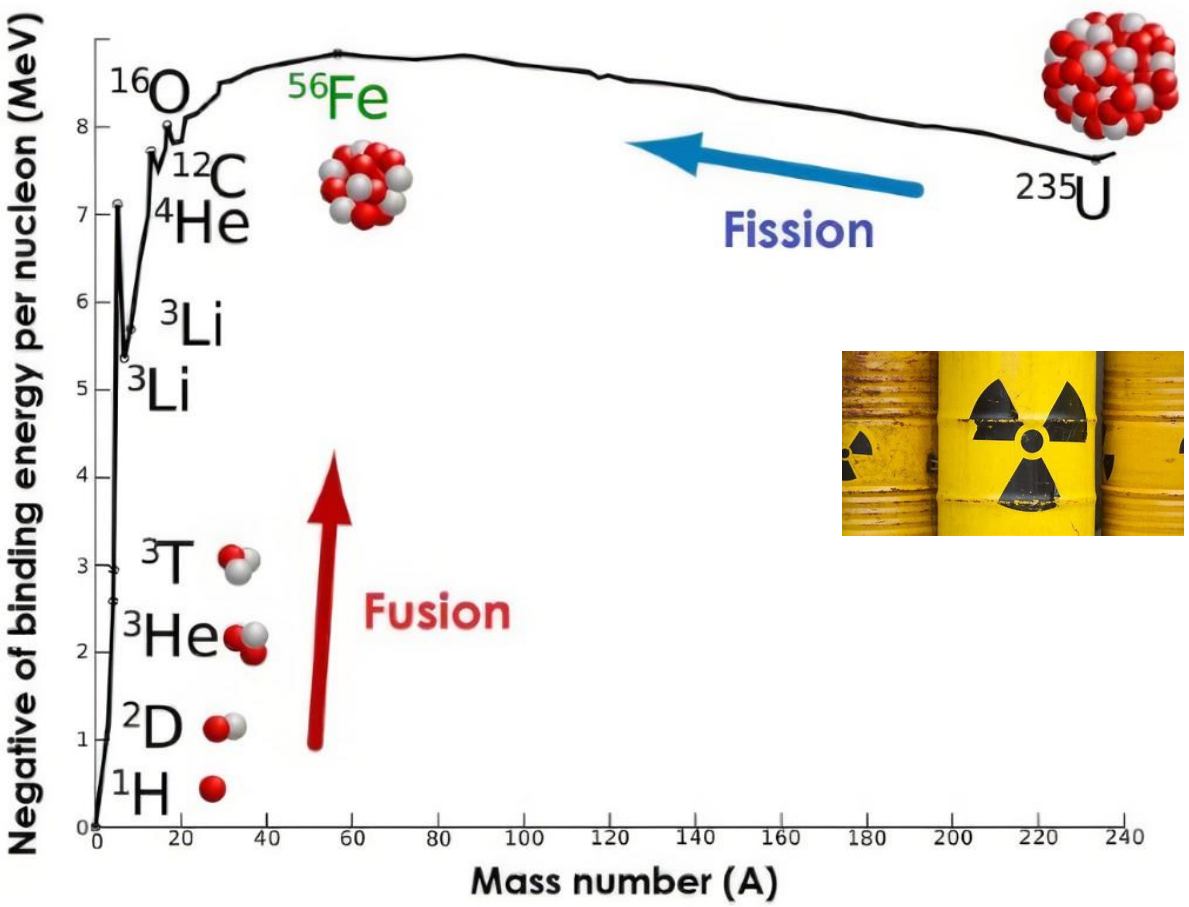
Heliumkerne mit 3.5 MeV

Bindungsenergie der Atomkerne

- Nukleare Bindungsenergie: Chemische Bindungsenergie

  MeV : eV = 10^6 :1

- Kernfusion im Innern der Sterne
- Freisetzung der nuklearen Asche („Sternenstaub“) durch Konvektion und Sternwinde oder explosiv in Supernovae
- Häufigkeiten spiegeln Fusionseffizienz und Stabilität der Kerne wider



Massive stars

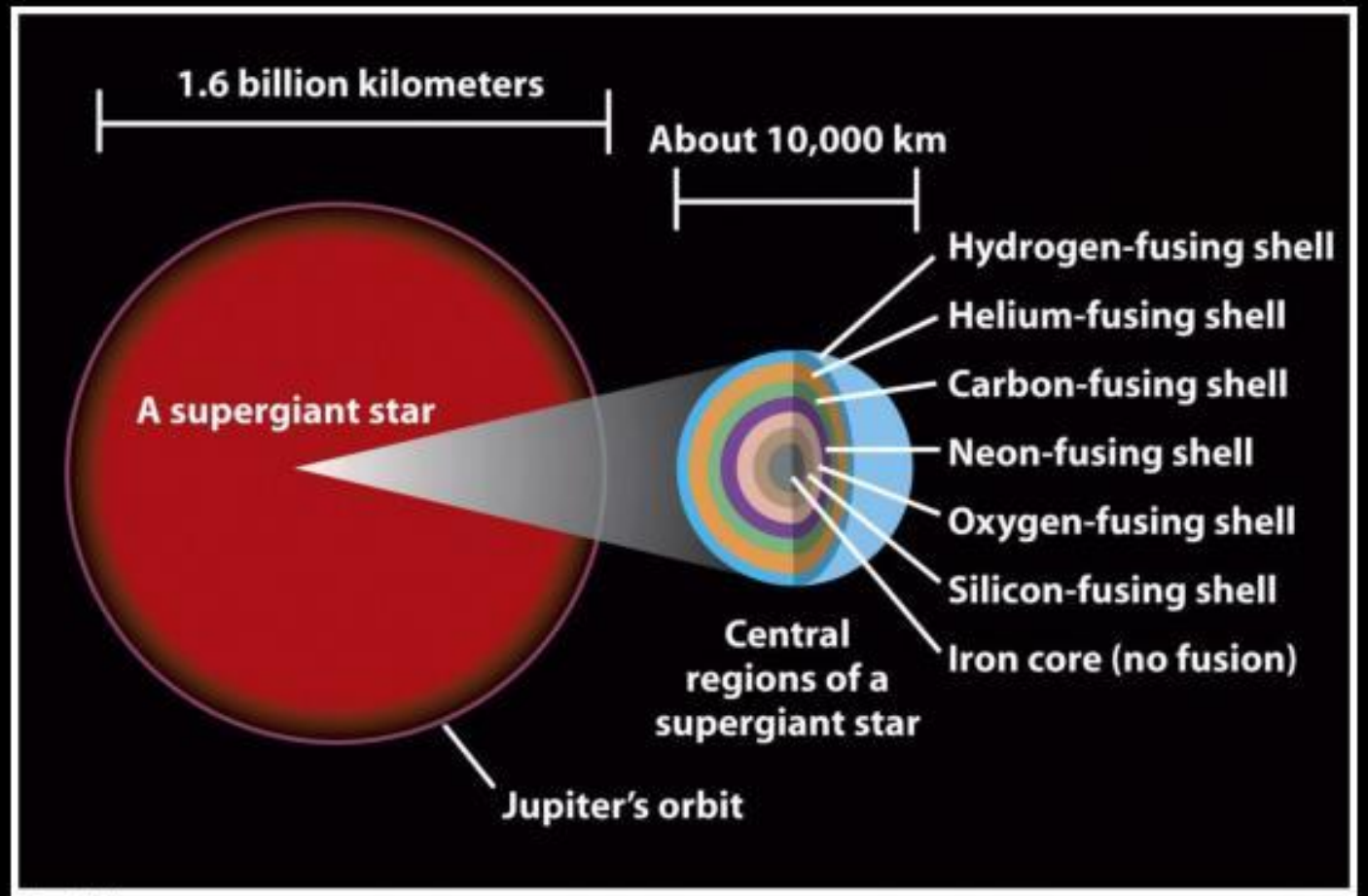
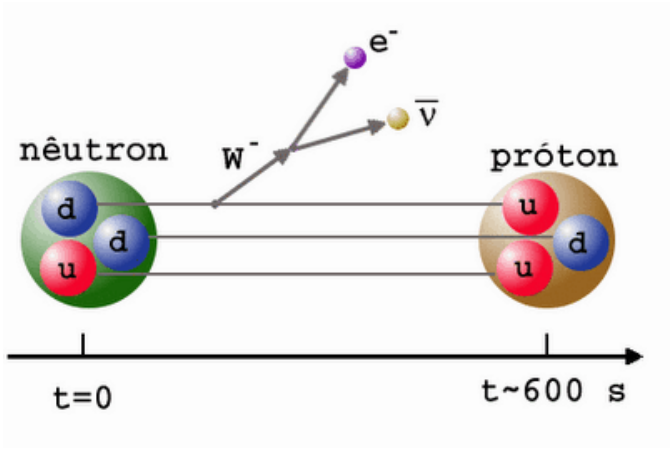
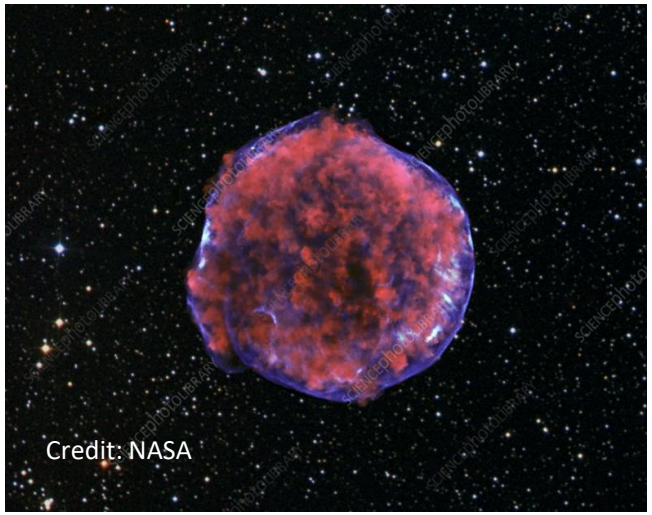
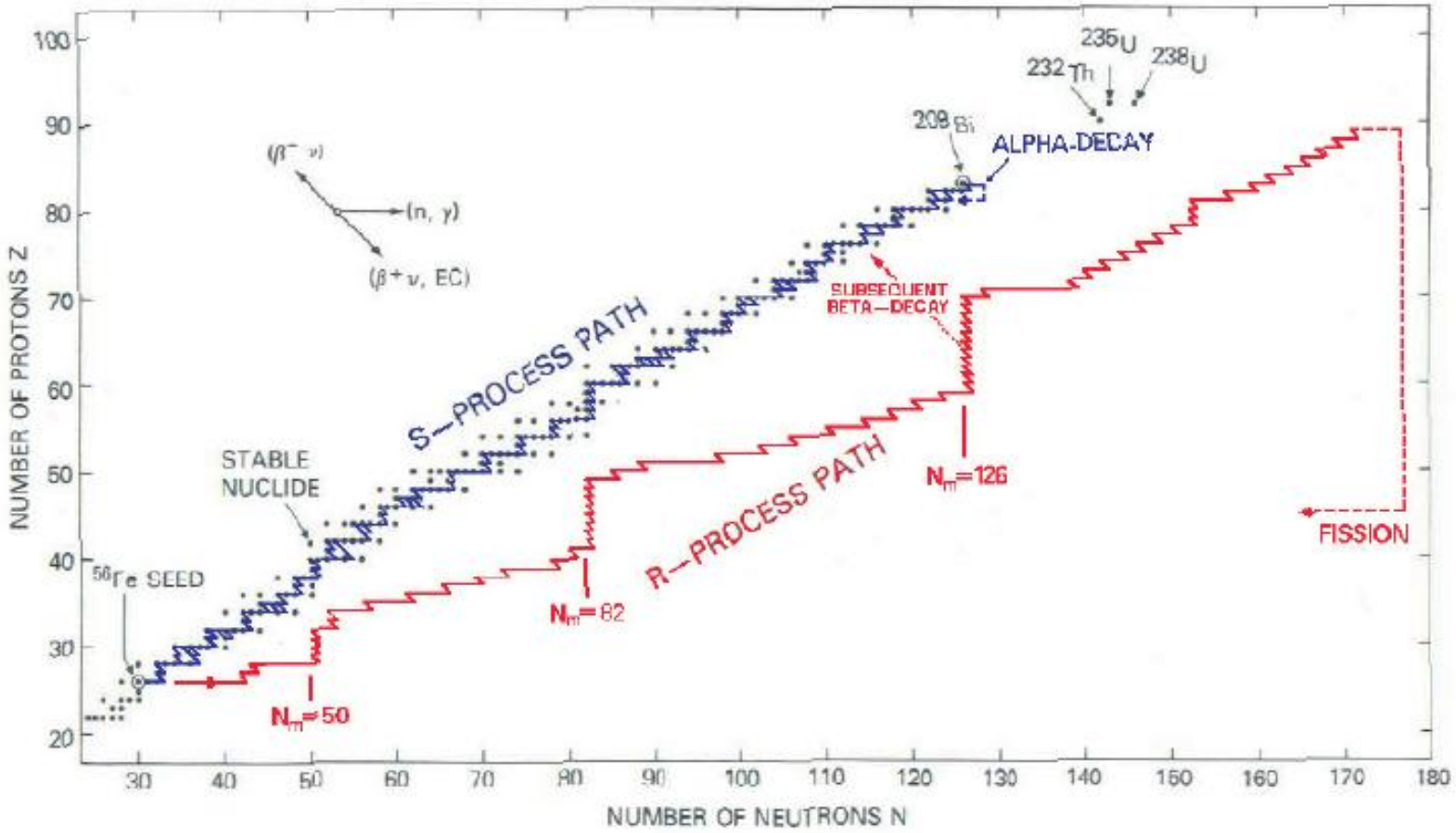


Figure 20-13
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

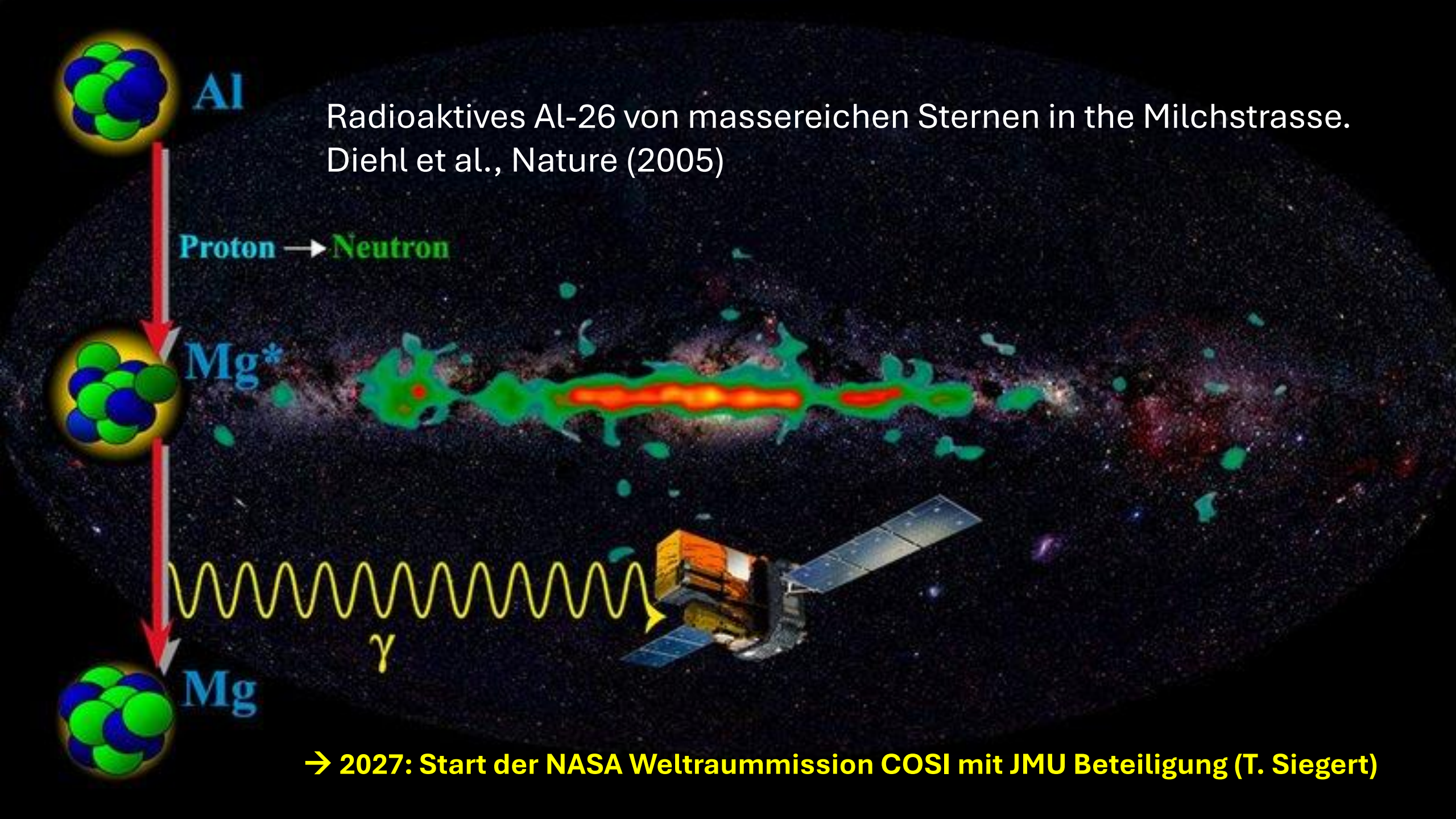
Explosive Nukleosynthese in Supernovae







Kernkollaps Supernovae / Supernovae Ia



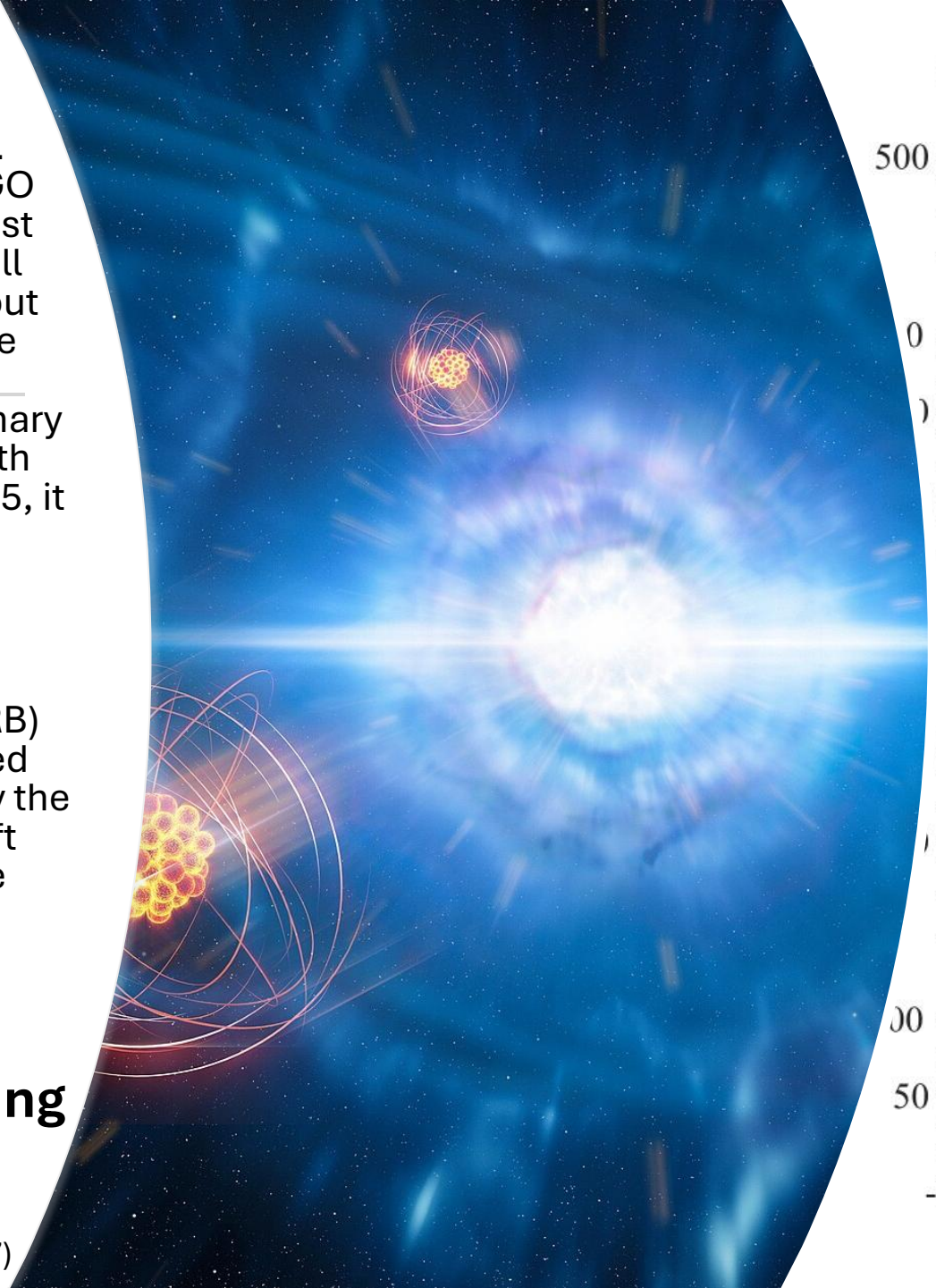
Radioaktives Al-26 von massereichen Sternen in the Milchstrasse.
Diehl et al., Nature (2005)

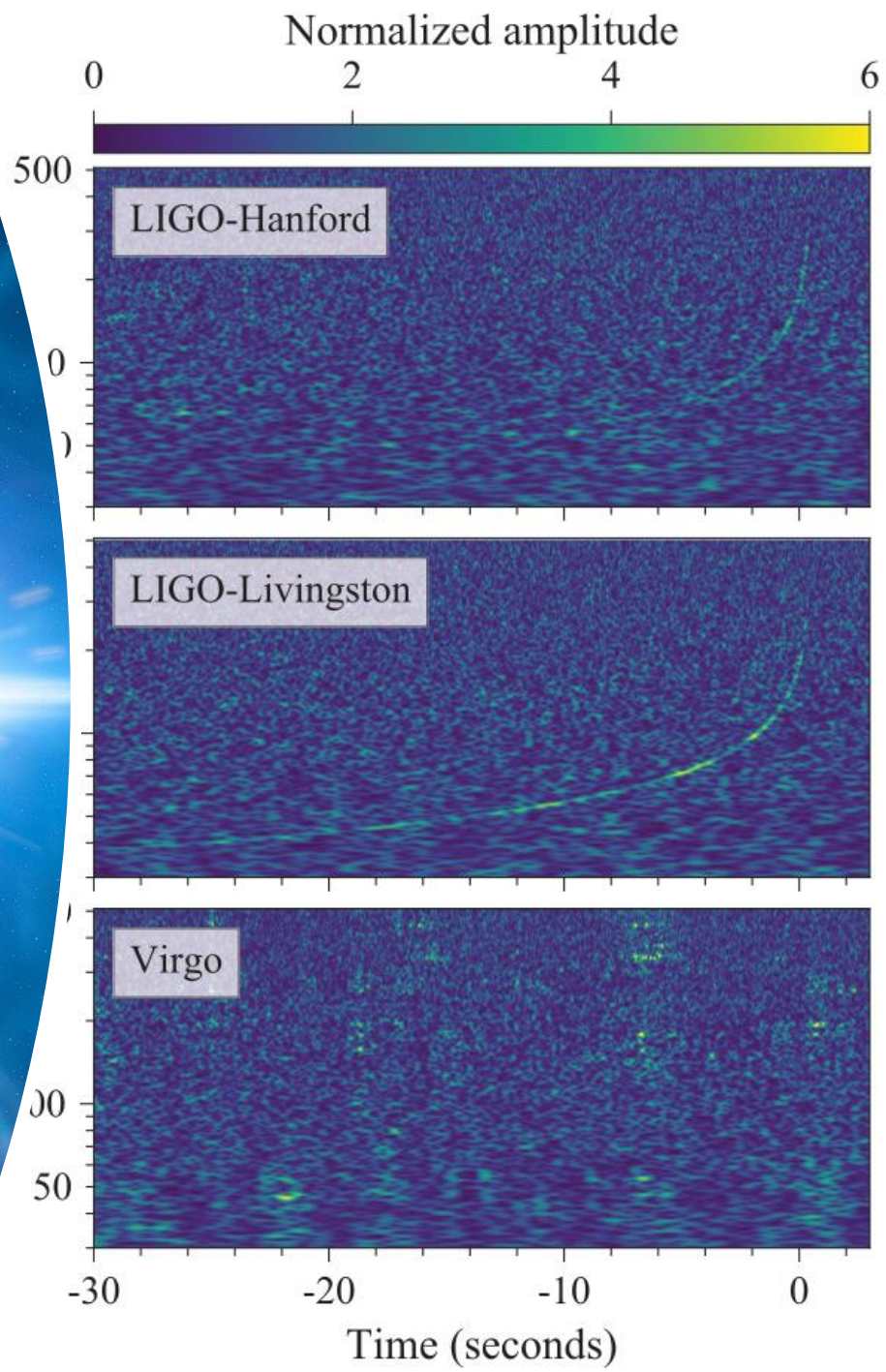
→ 2027: Start der NASA Weltraummission COSI mit JMU Beteiligung (T. Siegert)

GW170817 was a **gravitational wave** (GW) observed by the LIGO and Virgo detectors on 17 August 2017, originating within the shell elliptical galaxy NGC 4993, about 140 million light years away. The wave was produced by the last moments of the inspiral of a binary pair of neutron stars, ending with their merger. As of October 2025, it is the only GW detection to be definitively correlated with any electromagnetic observation.

A **short gamma-ray burst** (sGRB) of around 2 seconds, designated GRB 170817A, was detected by the Fermi and INTEGRAL spacecraft beginning 1.7 seconds after the GW emitted by the merger.

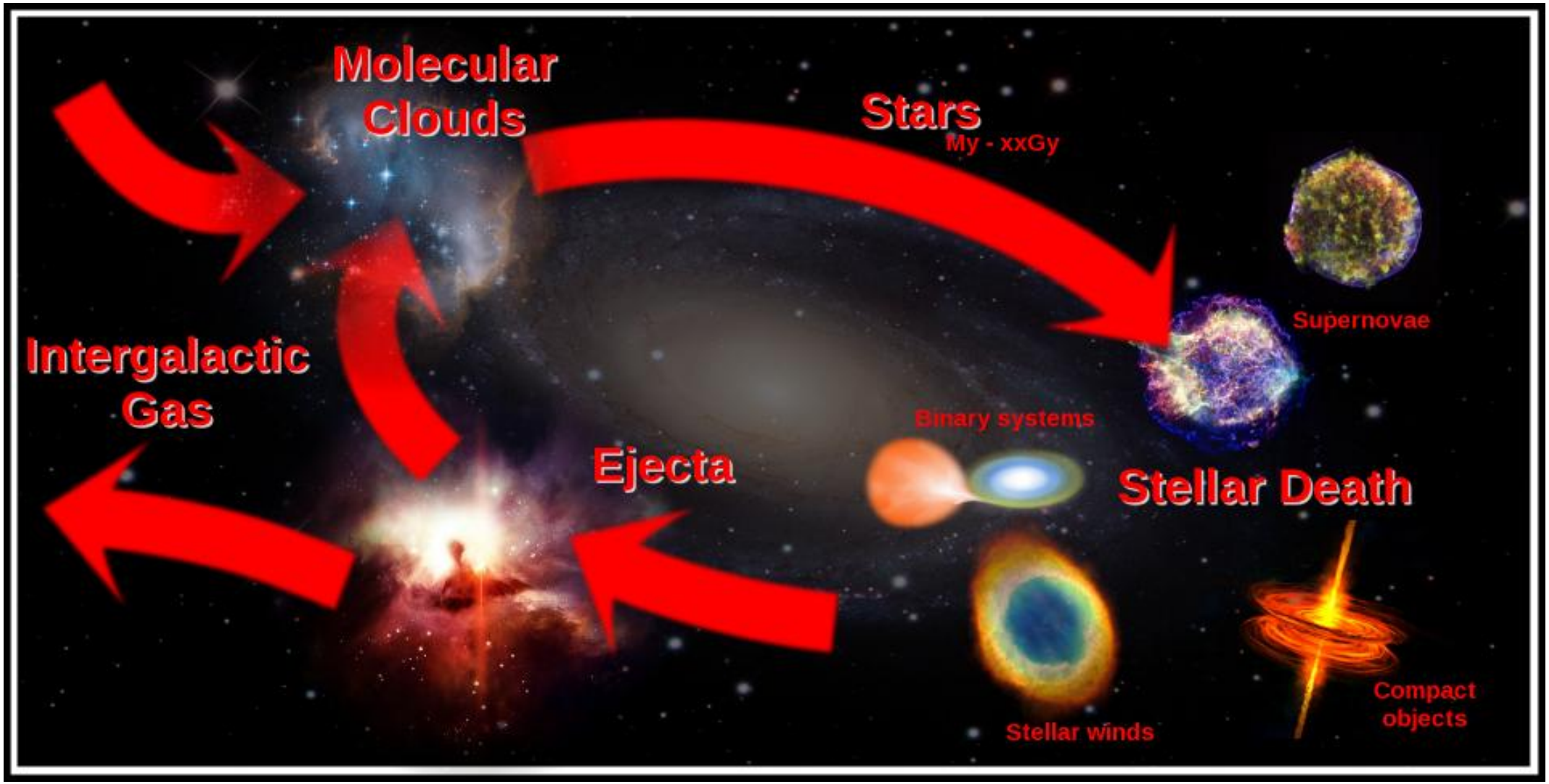
→ Neutron-rich environment producing r-process elements

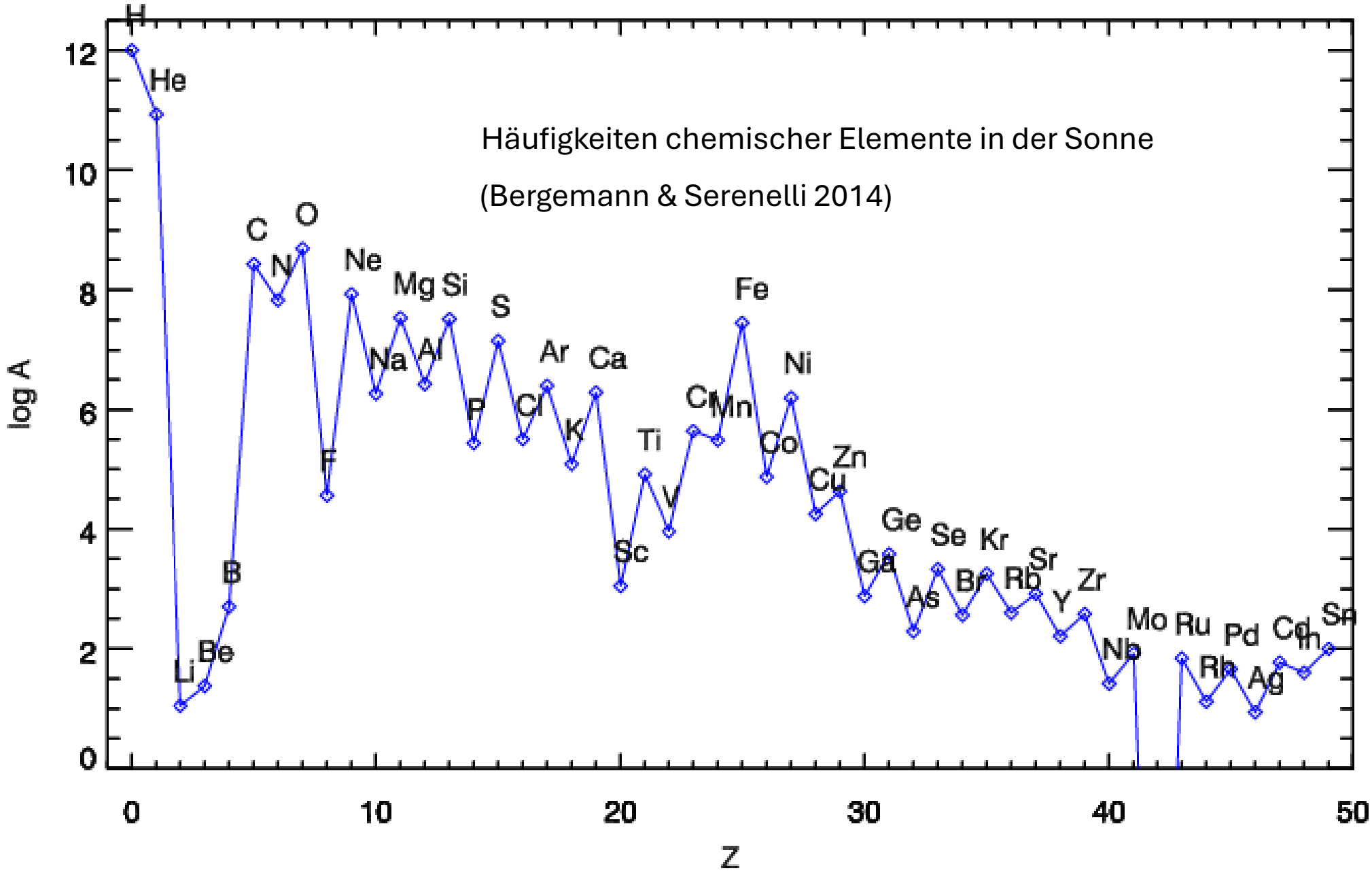


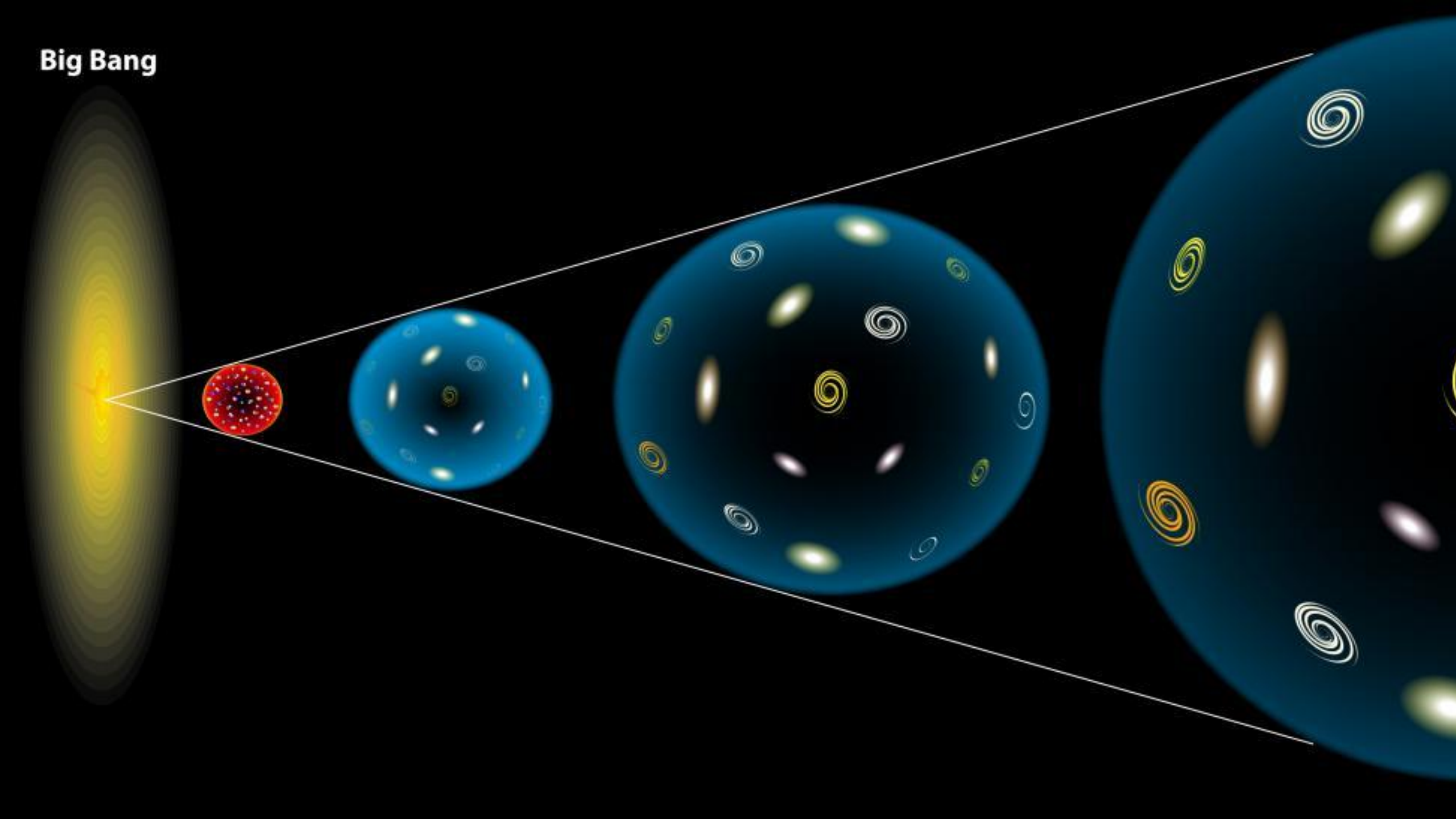


Abbott et al. (LIGO/VIRGO), PRL (2017)

Der Kreislauf der Materie

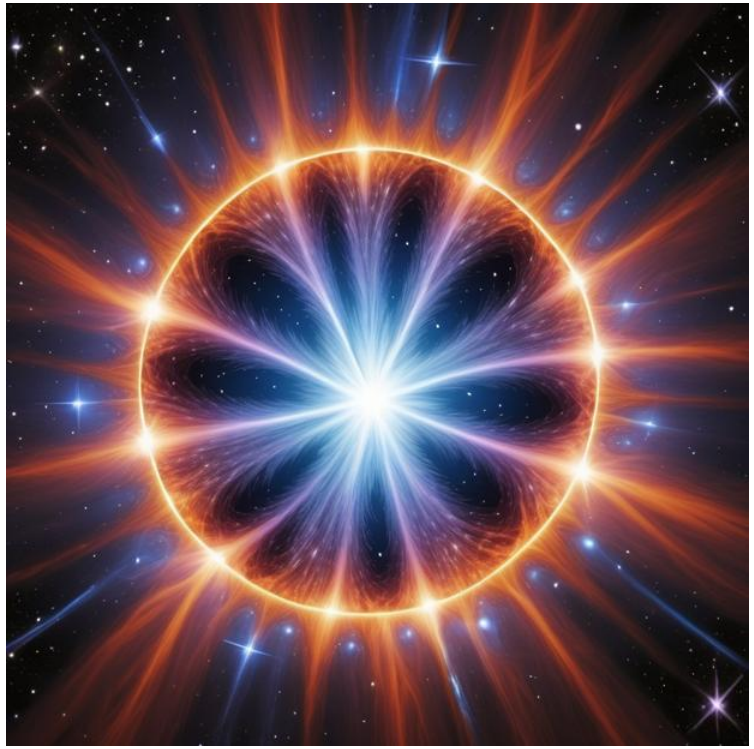


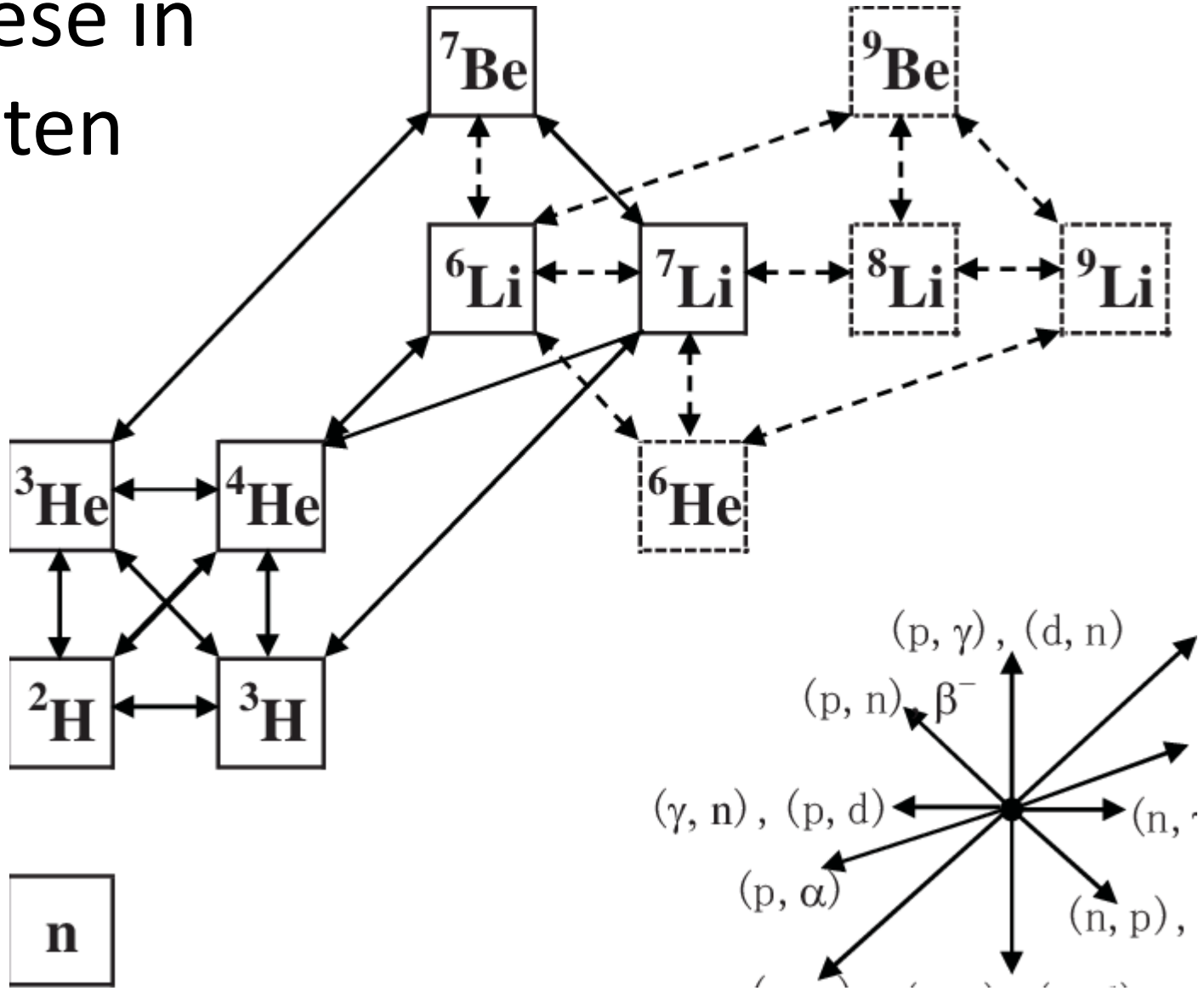

Häufigkeiten chemischer Elemente in der Sonne
(Bergemann & Serenelli 2014)
log A
Z
0
2
4
6
8
10
12
0
10
20
30
40
50
H
He
Li
Be
B
C
N
O
F
Ne
Na
Mg
Al
Si
P
S
Cl
Ar
K
Ca
Sc
Ti
V
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Ga
Ge
As
Se
Br
Kr
Rb
Sr
Y
Zr
Nb
Mo
Ru
Rh
Pd
Ag
Cd
In
Sn


Big Bang

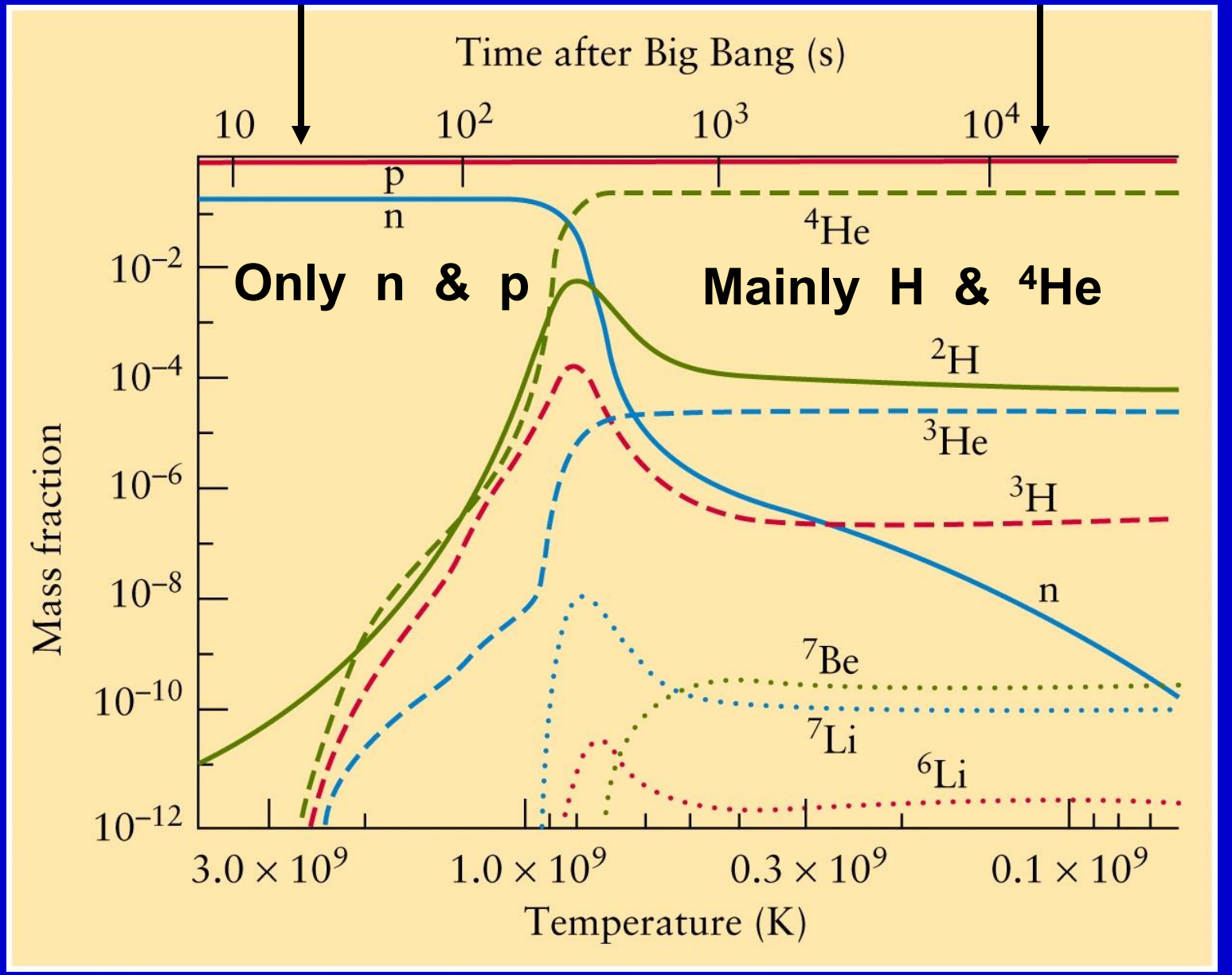
Urknall-Nukleosynthese in den ersten drei Minuten

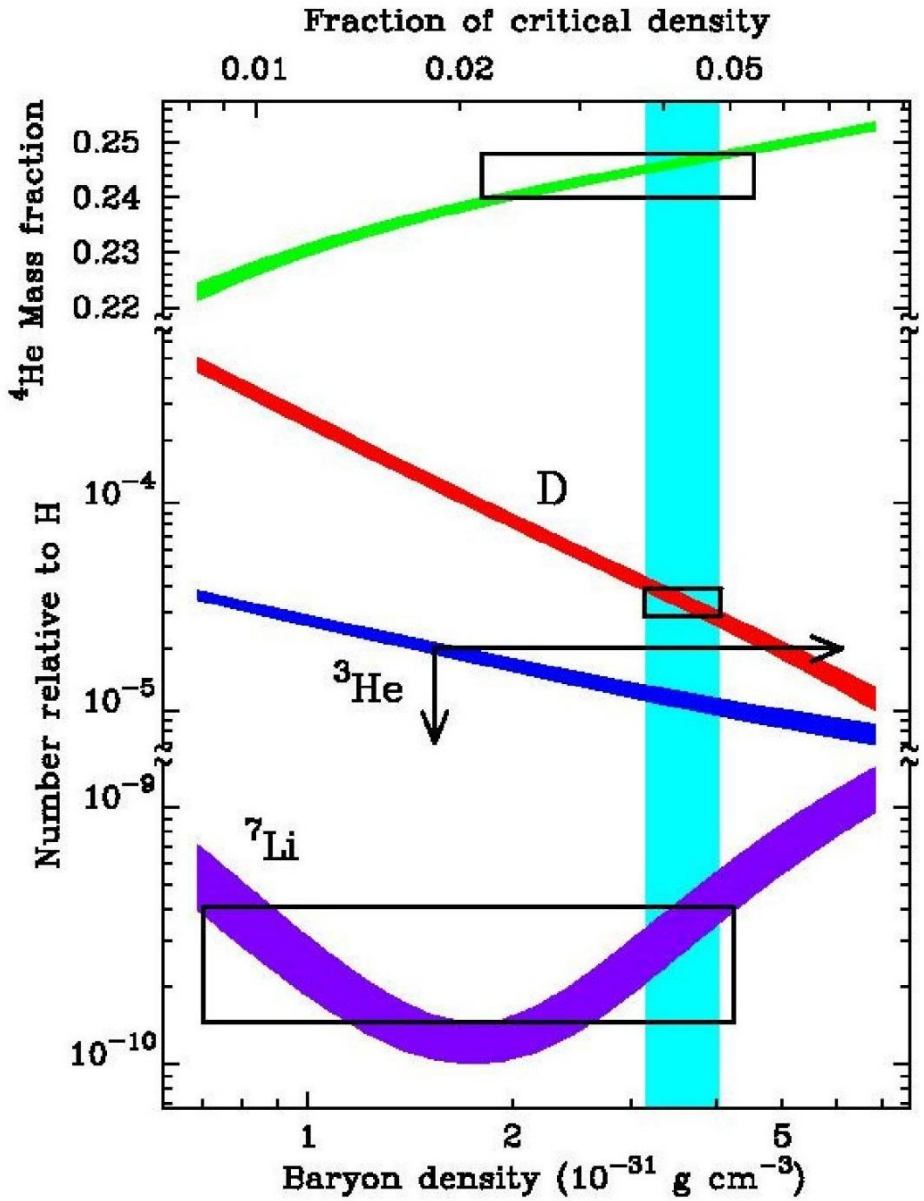
(Alpher, Bethe, Gamov 1948)





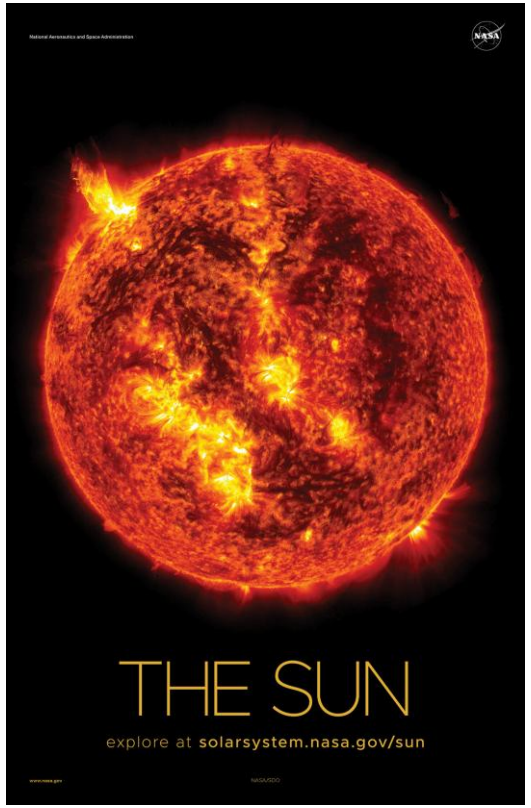
Pre - BBN **Post - BBN**





BBN Vorhersagen der primordialen Häufigkeiten leichter Elemente als Funktion der heutigen Baryonendichte ($\rho_{b,0}$, untere Achse) und des entsprechenden Dichteparameters Ω_b, wobei $h = 0.65$ angenommen wurde. Die vertikale Ausdehnung der Rechtecke gibt die gemessenen Werte dieser Häufigkeiten an (oben: He^4, Mitte: D, unten Li^7); die horizontale Ausdehnung ergibt sich durch den Überlap dieser Bereiche mit den theoretischen Kurven. Die durch die drei Elemente erlaubten Werte von Ω_b überlappen, dargestellt durch den vertikalen Streifen. Die Deuterium-Messungen geben die stärksten Einschränkungen an Ω_b.

„Schauen Sie tief in die Natur und dann werden Sie alles besser verstehen.“ (Albert Einstein)



Inertialeinschluß Laser-Fusion

Magnetfeldeinschluß-Fusion

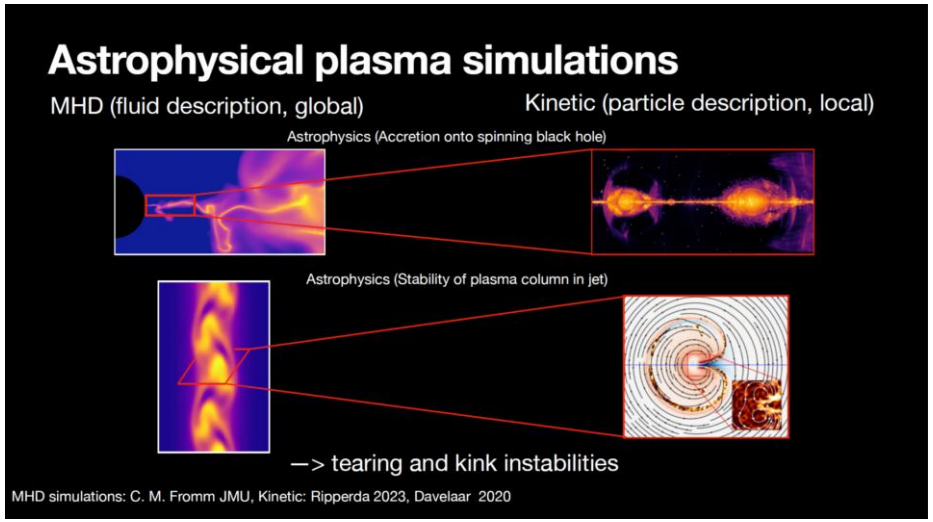
Was ersetzt die Gravitation beim Einschluß des Plasmas? Zwei Ansätze:

- Starke Magnetfelder
  - Magnetisierte Plasmen sind ebenfalls aus der Astrophysik in vielen Erscheinungsformen bekannt (**Sonneneruptionen, Akkretion, Jets, interstellares Medium** usw.). Wissen über Wärmetransport, Instabilitäten, nicht-thermische Phänomene, Turbulenz kann genutzt werden. Wissen wird **durch numerische Simulationen** genutzt.
- Nichts. Man verzichtet auf quasi-stationäres Brennen
  - Das **Plasma explodiert** nach der Energiefreisetzung durch Kernfusion
  - Inertial-“Einschluß“ nach Beschuß von Brennstoff-Pellets mit Laserlicht oder Ionenstrahlen
  - Astrophysik: **Supernova-Explosionen und Gammastrahlen-Blitze** (GRBs)

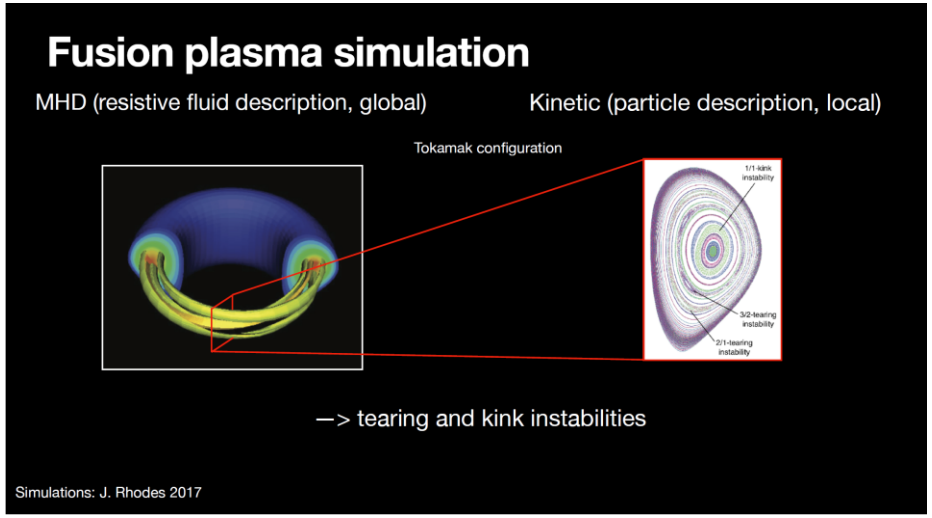
Synergien

Parallelen in den Fragestellungen der Fusions-Plasmaphysik und in der Astro-Plasmaphysik

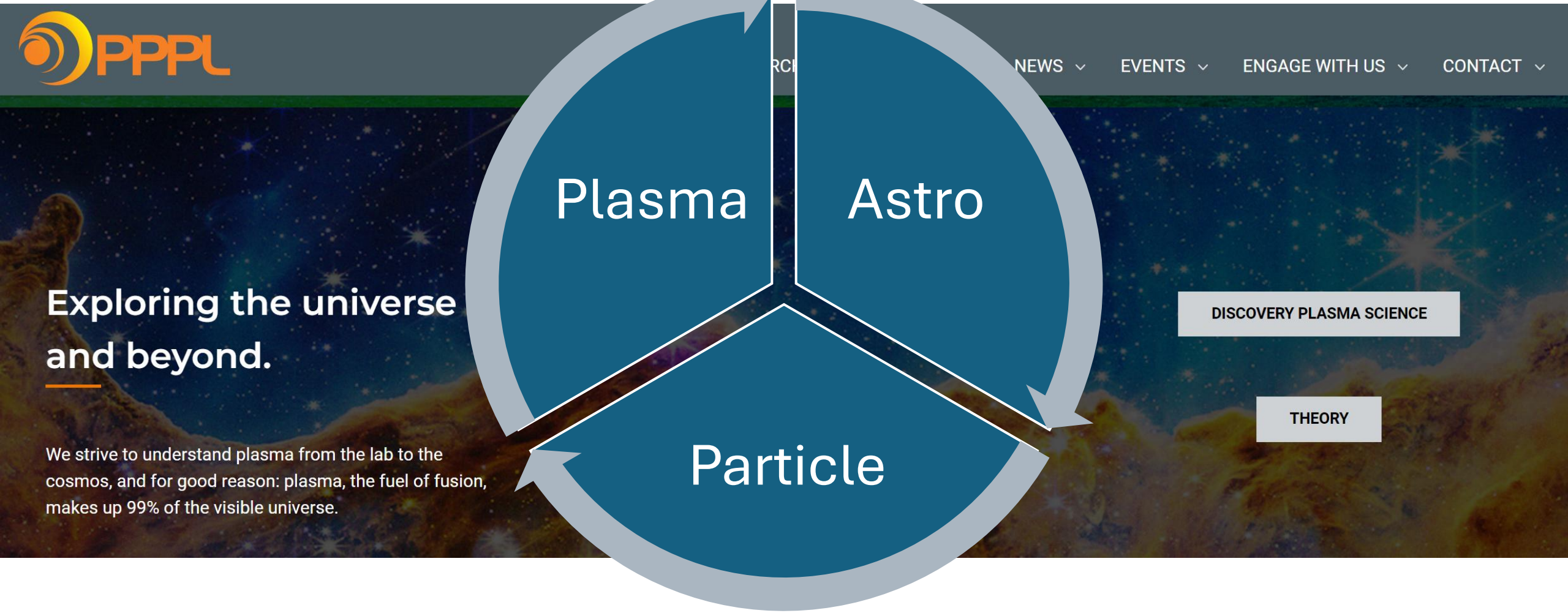
Kooperation mit der Astro-Plasmaphysik Abteilung des IPP in Garching (F. Jenko)



Courtesy: C. Fromm (2023)

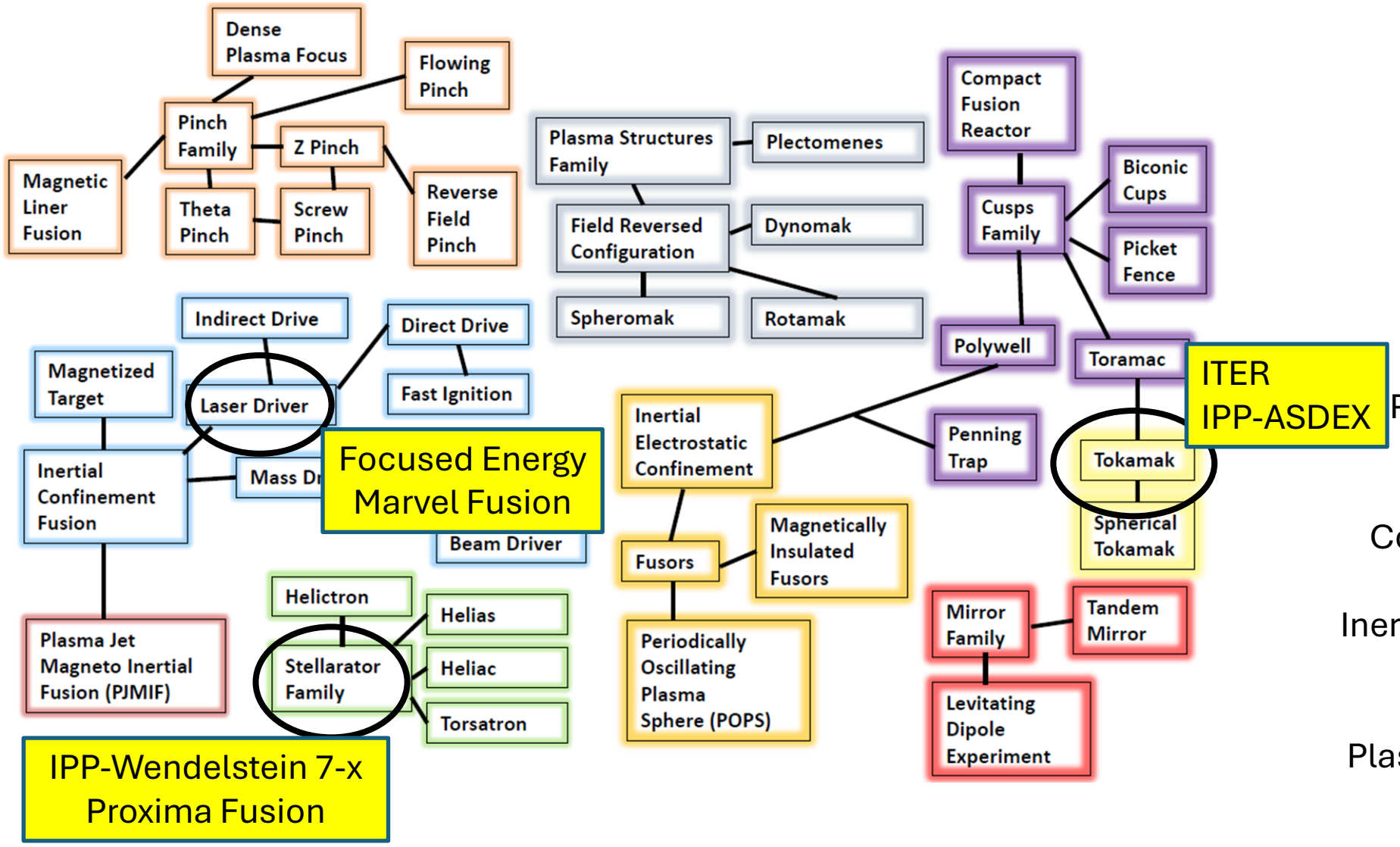


Würzburg Plasma Simulation Lab
at the crossroads of physics and artificial intelligence



AI-accelerated plasmaphysics simulations
for astrophysics, fusion, nuclear and particle physics

Schematische Darstellung verschiedener Klassen vn experimentellen Ansätze zur Erzeugung von Fusionsplasmen der letzten 70+ Jahre (Wikipedia, 2021)



Pinch (orange)

Mirror (rot)

Cusp (violett)

Tokamaks & Stellarators (gelb,grün)

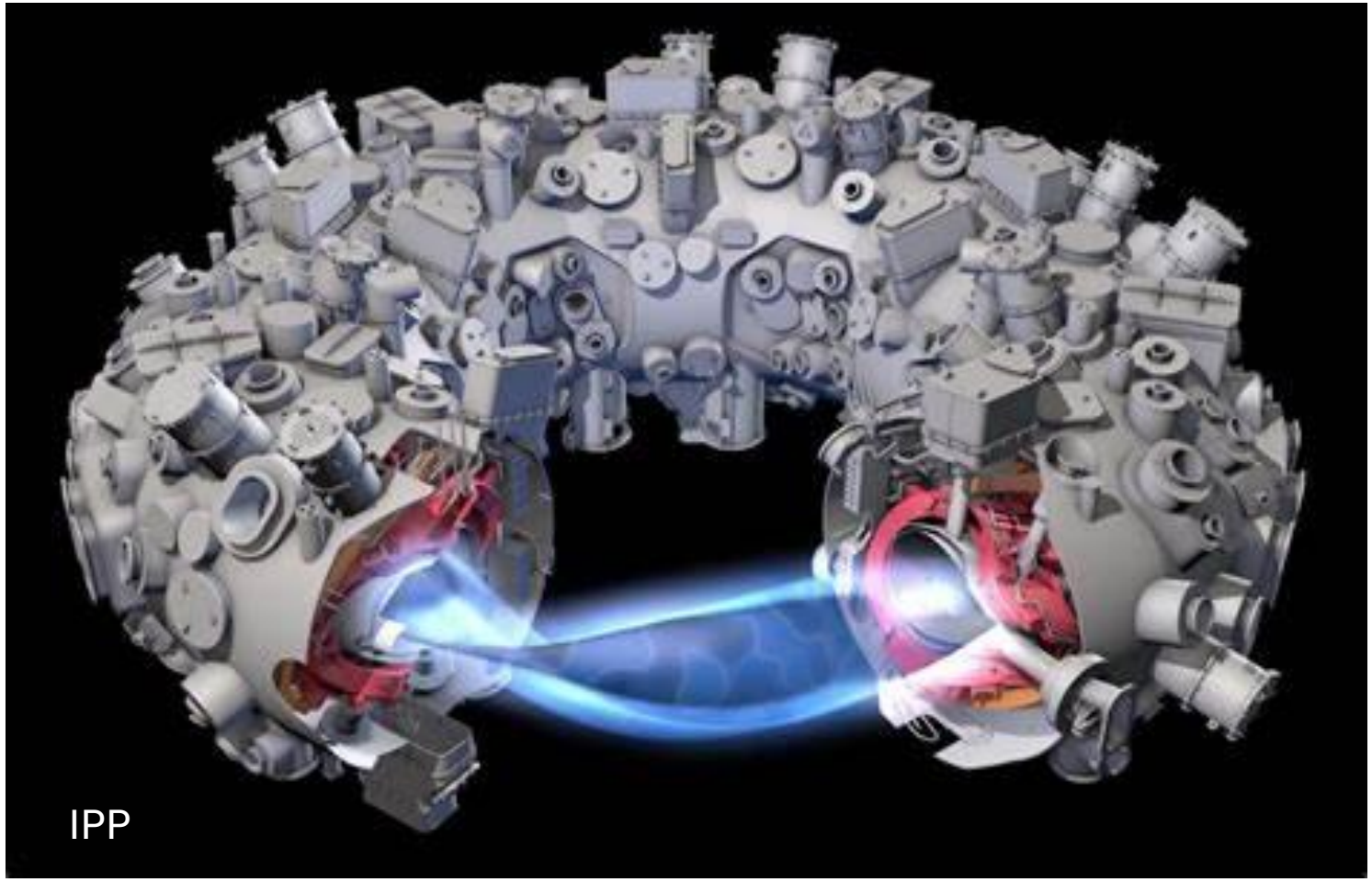
Plasma Structures (grau)

Inertial Electrostatic Confinement (dunkelgelb)

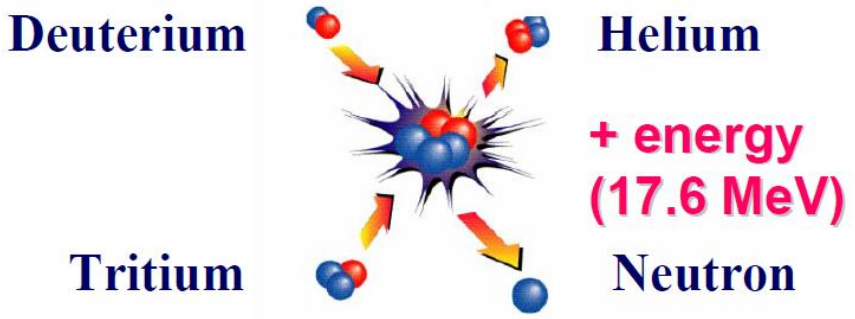
Inertial Confinement Fusion (blau)

Plasma Jet Magneto Inertial Fusion (dunkelrosa)

Kernfusion im Reaktor

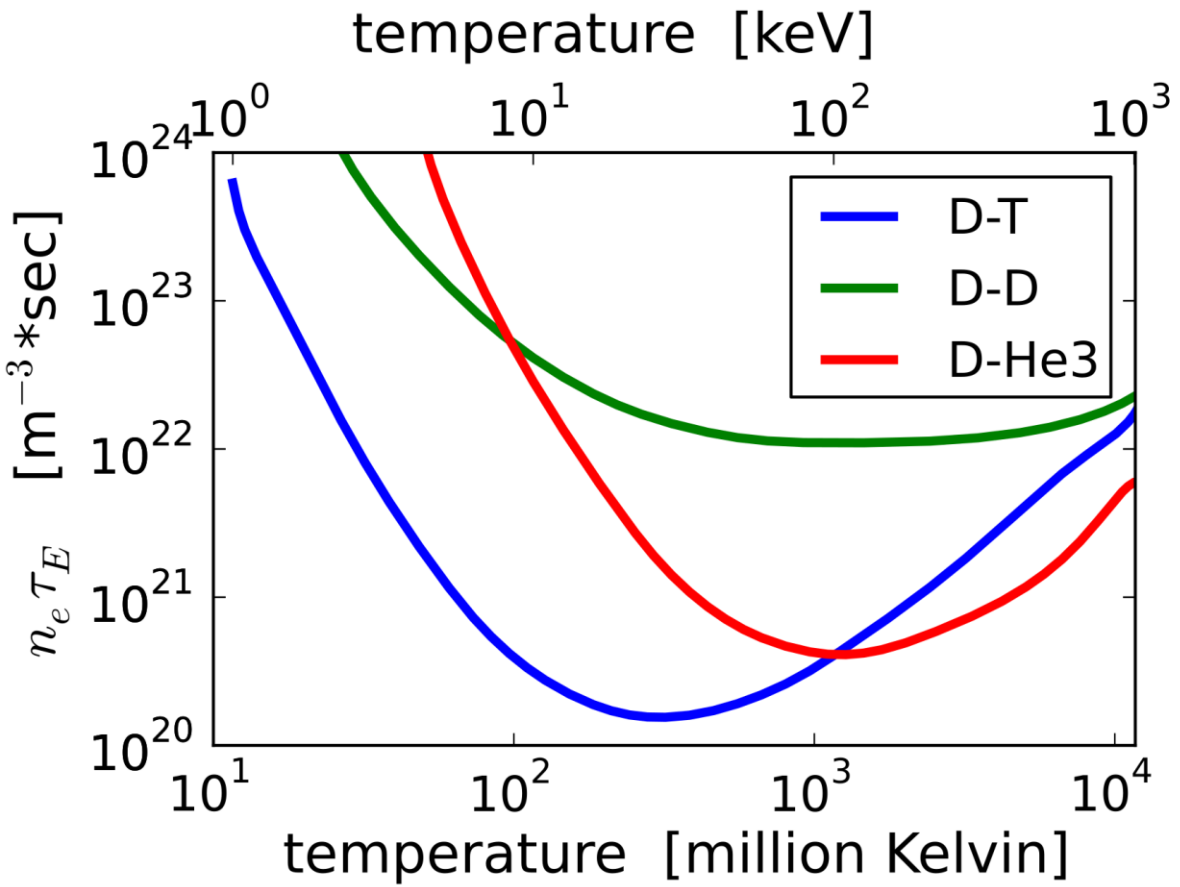


- **Wendelstein 7x (IPP)**
- **Einschluß des Plasmas durch Magnetfeld**
- **Stellarator-Geometrie**
- **Heizung mit Mikrowellen**
- **Einschlußrekord von 8min / 1,2 GJ**
- **Design Upgrade für DT-Fusion**



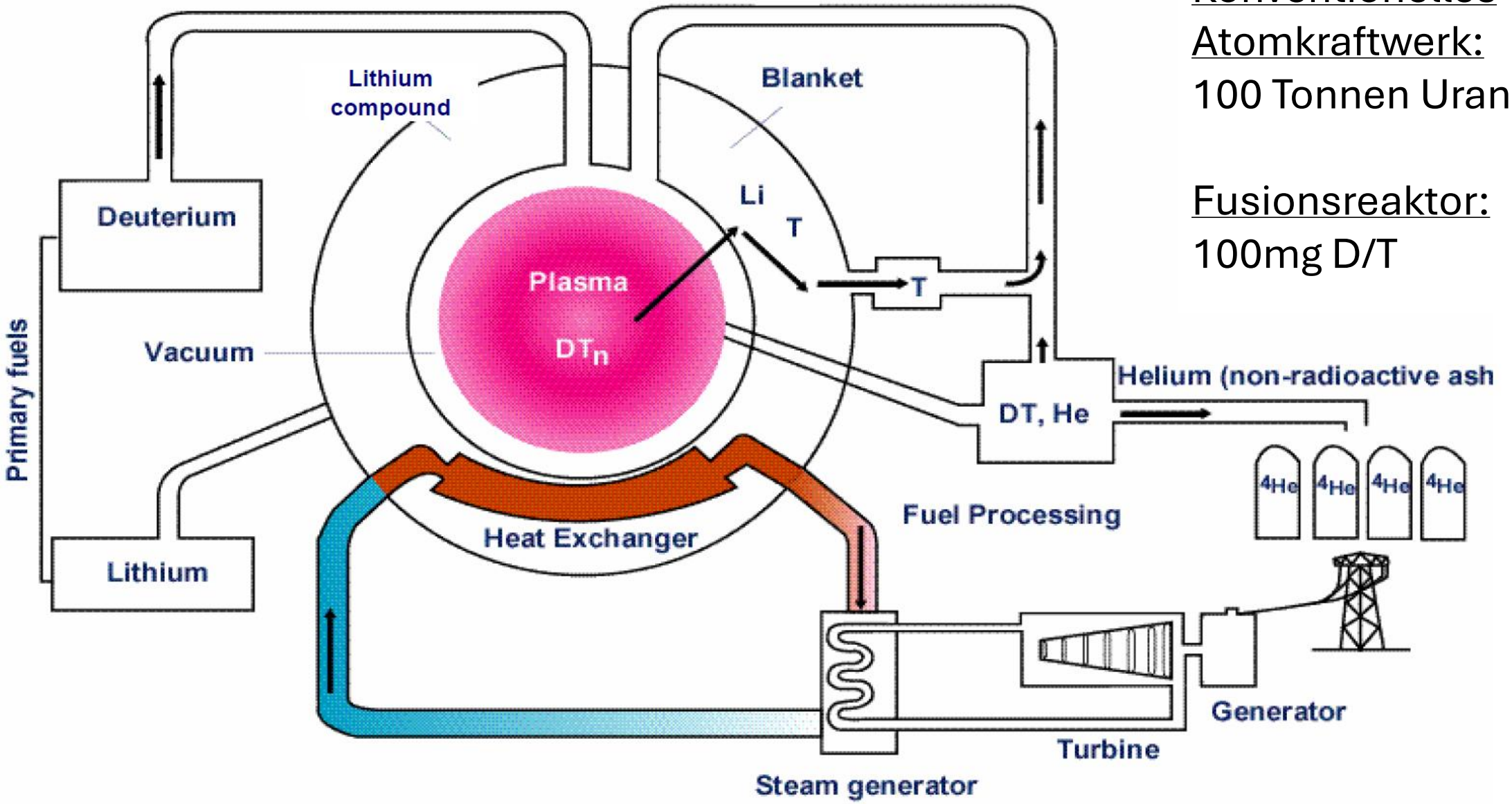
Lawson-Kriterion für energetisch selbsterhaltende Fusionsreaktionen

- Balance aus Plasmaheizung durch Fusionsreaktion und Kühlung durch zeitlich begrenzten Einschluß (Confinement time)
- Lawson-Kriterion bezeichnet den Wert des Produkts von Plasmadichte und Einschlußzeit bei der Temperatur des Minimums



<u>Konventionelles Atomkraftwerk:</u>
100 Tonnen Urankern

<u>Fusionsreaktor:</u>
100mg D/T



Fossile Energe vs. Fusionsenergie

- 1GW Kraftwerk: 10.000 Tonnen fossiler Brennstoff täglich
- 1GW Fusionskraftwerk: 1kg DT täglich
- Deuteriumgewinnung aus Meerwasser (1/6700)
- Tritium durch Brüten mit 7Li(n,α)Tn‘-2.47 MeV

Der Brennwert eines Laptop-Lithiumakkus und einer halben Badewanne Wasser entsprechen 40t fossiler Brennstoffe und decken den Strombedarf eines Einfamilienhaushalts für 30 Jahre

RESEARCH ARTICLE| JUNE 08 2022

Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion

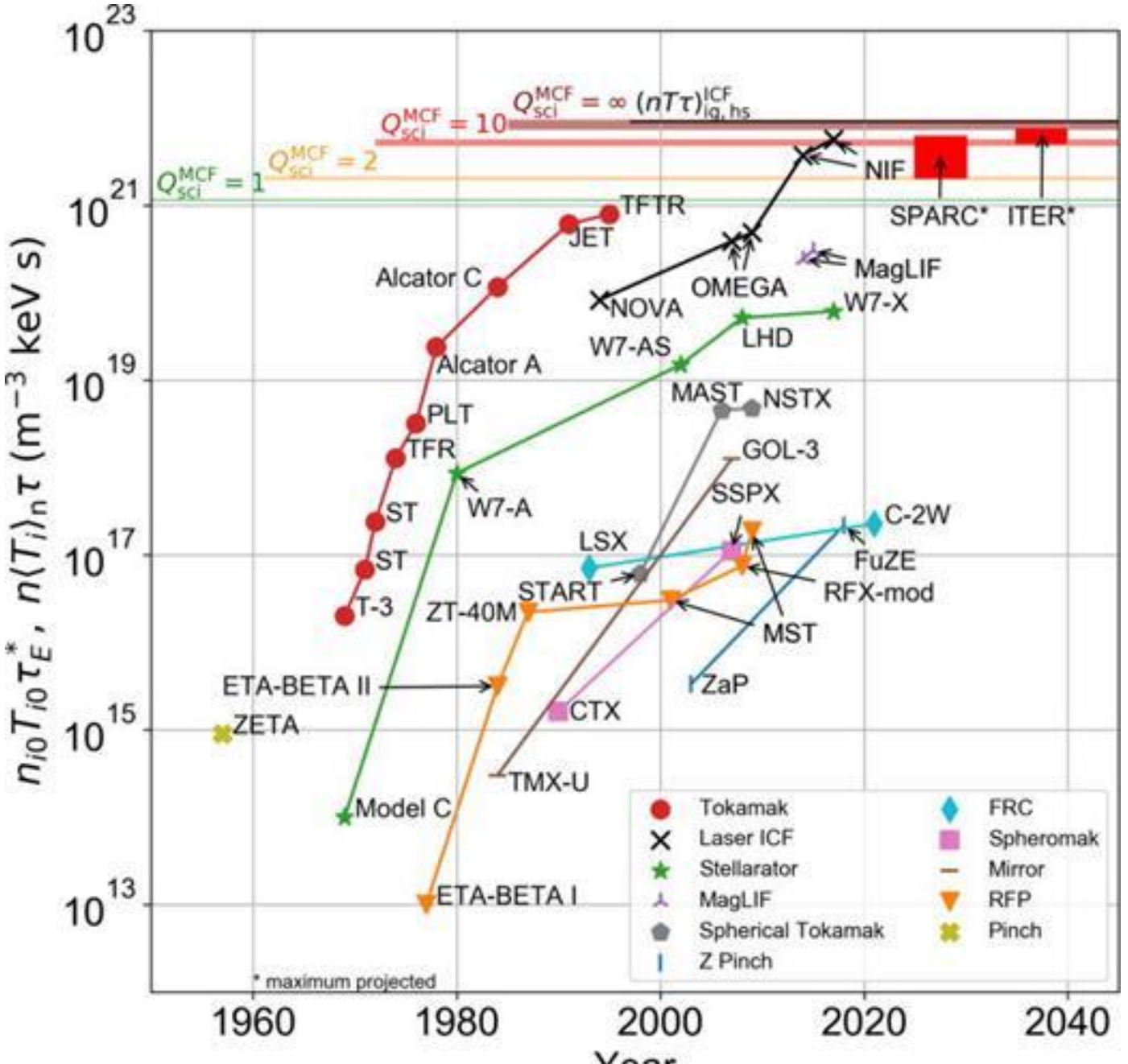
Special Collection: Papers from the 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics

Samuel E. Wurzel

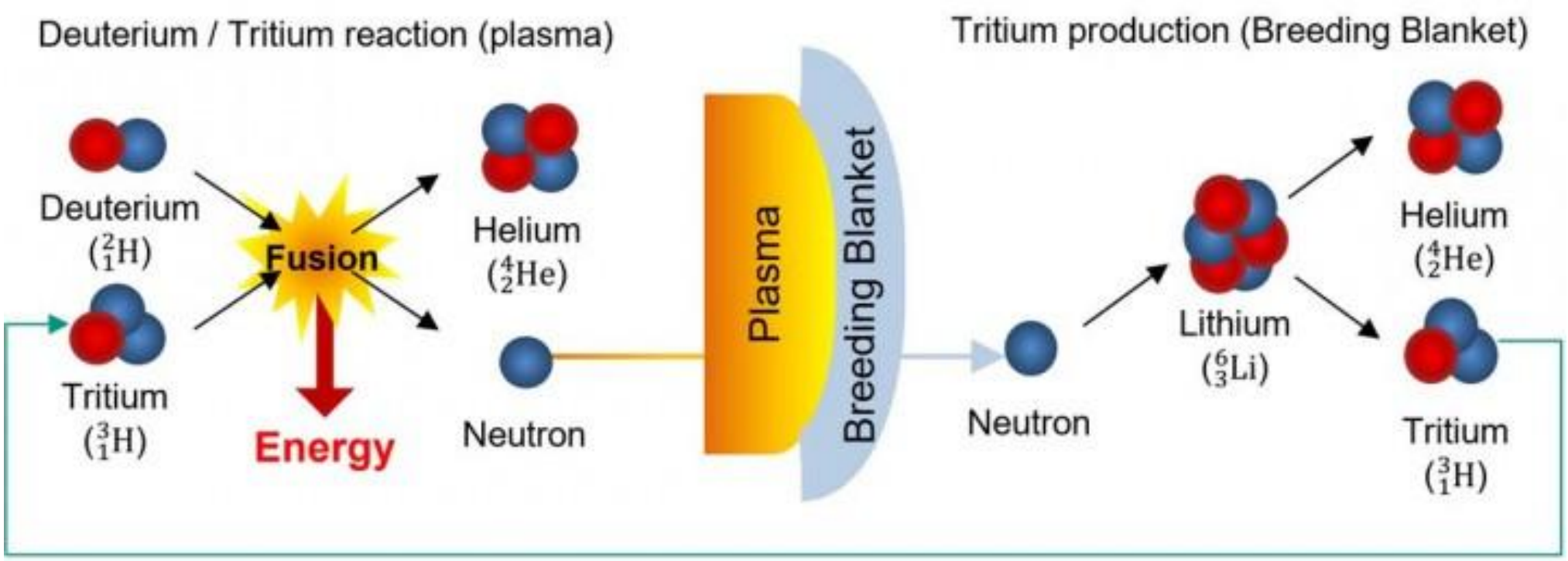
;

Scott C. Hsu

Author & Article Information
Phys. Plasmas 29, 062103 (2022)



Tritiumbrüten



Materialforschung: Keramiken oder Schmelzen aus Li-6 Verbindungen und Neutronenvervielfachern (Be, Pb)

Table 5. T breeding performance of the selected T breeder compounds

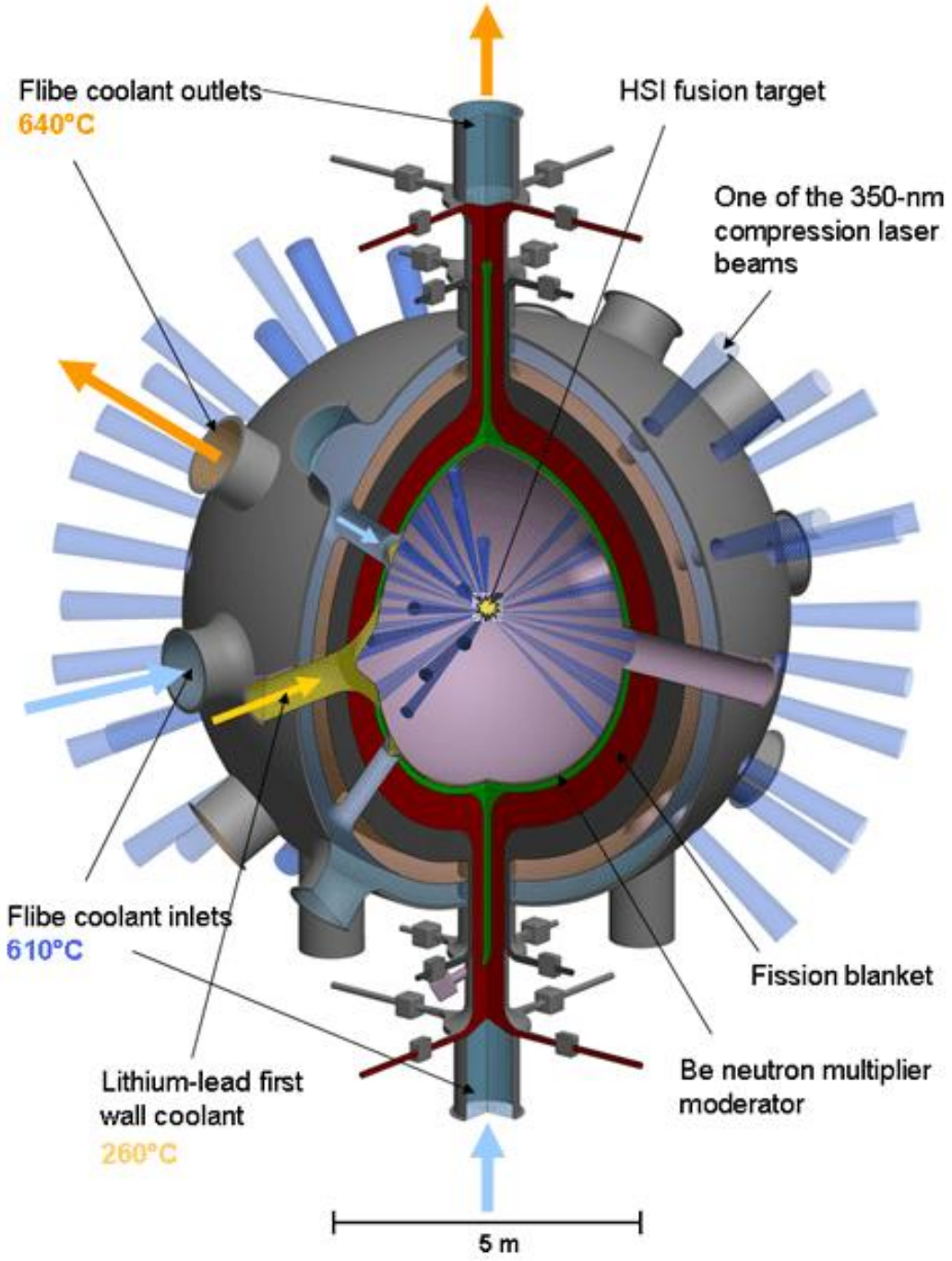
Compound	Atomic density of Li [at/Å³]	% Li atomic density	Compound density RT [kg/m³]	Melting point [°C]	^{6}Li enrichment [%]	TBR
Non-ceramics						
Li_3N	0.0674	75.0	1.30	813	60%	1.23
LiF	0.0612	50.0	2.64	848	60%	1.21
Ceramics						
Li_8PbO_6	0.0575	53.4	4.28	>800	60%	1.21
Li_8SiO_6	0.0590	53.3	2.20	830*	60%	1.20
Li_8ZrO_6	0.0591	53.3	2.98	1336	60%	1.20
Li_8GeO_6	0.0567	53.4	2.64	n/a	60%	1.19
Li_8CeO_6	0.0537	53.3	3.25	n/a	60%	1.19
Li_5AlO_4	0.0539	50.0	2.25	1047	60%	1.19
Li_8SnO_6	0.0608	53.3	3.41	1050	60%	1.19
Li_6ZnO_4	0.0609	54.6	2.86	n/a	60%	1.19
Li_6MnO_4	0.0562	54.5	2.50	n/a	60%	1.18
Li_5FeO_4	0.0514	50.0	2.64	n/a	60%	1.18
Li_4TiO_4	0.0444	44.5	2.57	>1000	60%	1.17
Li_6CoO_4	0.0607	53.2	2.77	n/a	60%	1.17
Li_8CoO_6	0.0565	53.3	2.47	n/a	60%	1.17
Li_4SiO_4	0.0482	44.4	2.40	1258	60%	1.15
$Li_6Zr_2O_7$	0.0383	40.0	3.56	1267	60%	1.15
Li_4GeO_4	0.0463	44.9	3.16	1298	60%	1.15
Li_2TiO_3	0.0376	33.3	3.43	1533	60%	1.12

Table 6. T breeding performance of the selected solid neutron multiplier compounds

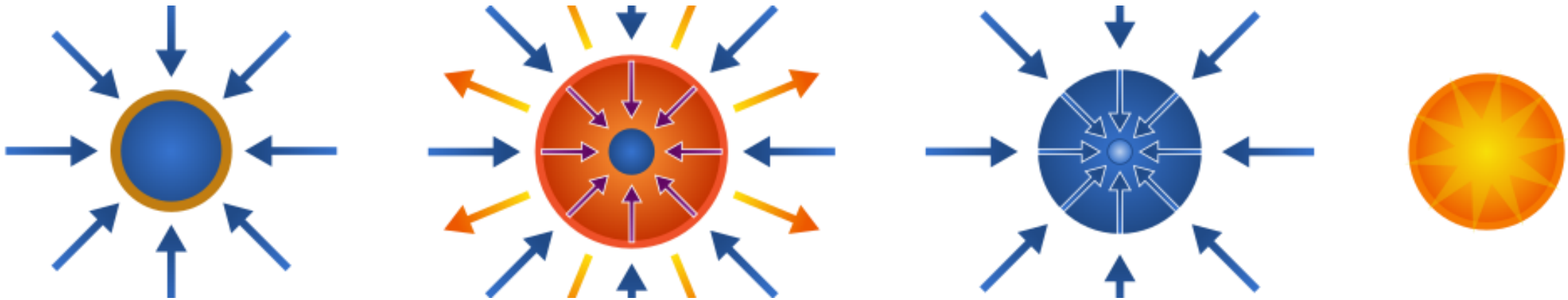
Compound	Atomic density of NMM [at/Å³]	% Be or Pb atomic density	Compound density RT [kg/m³]	Melting point [°C]	^{6}Li enrichment [%]	TBR pebble bed form	TBR slab form
Beryllide intermetallics							
$Be_{12}Cr$	0.1096	92.3	2.43	1338	60%	1.09	n/a
$Be_{12}V$	0.1085	92.3	2.39	1700	60%	1.09	n/a
$Be_{12}Ti$	0.1056	92.3	2.28	1520	60%	1.08	n/a
$Be_{13}Zr$	0.1025	92.8	2.73	1800	60%	1.08	n/a
$Be_{13}Y$	0.0968	92.8	2.55	1920	60%	1.07	n/a
$Be_{13}Mg$	0.0990	92.9	1.79	960	60%	1.07	n/a
$Be_{13}Ba$	0.1102	92.9	3.59	1807	60%	1.06	n/a
$Be_{12}Mn$	0.1063	92.3	2.40	n/a	60%	1.02	n/a
Be_2C	0.0762	66.7	1.90	2100	60%	1.00	n/a
$Be_{22}W$	0.1119	95.6	3.23	1520	60%	0.94	n/a
Be (ref.)	0.1234	100	1.85	1285	60%	1.15	n/a
Plumbide intermetallics							
$LaPb_3$	0.0225	66.4	10.72	1170	60%	0.85	n/a
					90%	0.94	1.02
YPb_3	0.0269	74.9	10.58	721	60%	0.86	n/a
					90%	0.94	1.00
YPb_2	0.0240	66.7	10.03	970	60%	0.85	n/a
					90%	0.93	0.98
$CePb_3$	0.0259	75.1	10.91	1170	60%	0.83	n/a
					90%	0.92	0.97
Zr_5Pb_4	0.0227	52.1	10.33	1200	60%	0.84	n/a
					90%	0.93	0.96
Zr_5Pb_3	0.0162	37.4	9.69	1650	60%	0.82	n/a
$PrPb_3$	0.0261	75.0	11.03	1120	60%	0.82	n/a

Hernandez-Gonzalez et al., Fusion Engineering and Design (2018)

Trägheitseinschluß des Plasmas bei der laser-induzierten Fusion

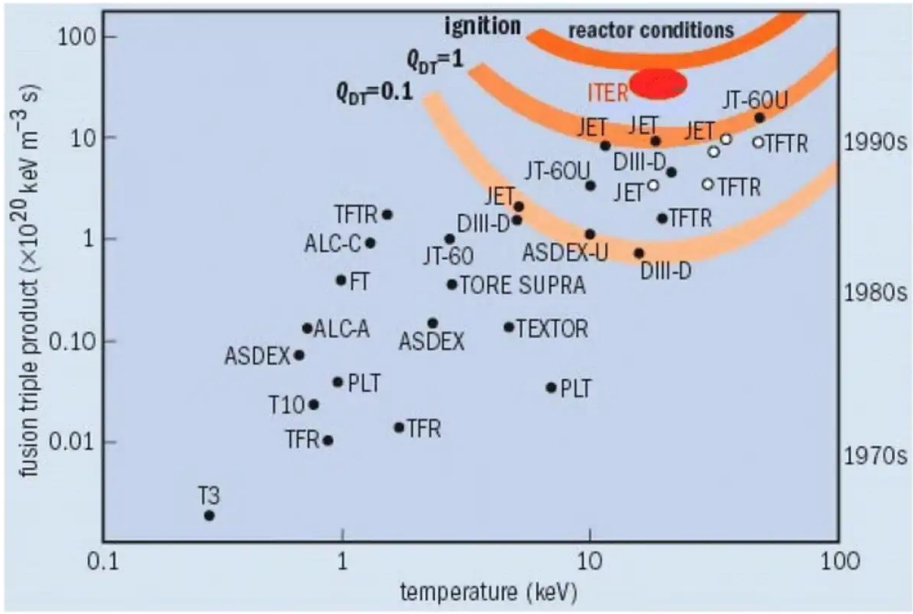


Reed, Parker, Forget, AIP Conf. Proc. 1442, 224–231 (2012)



Status Quo

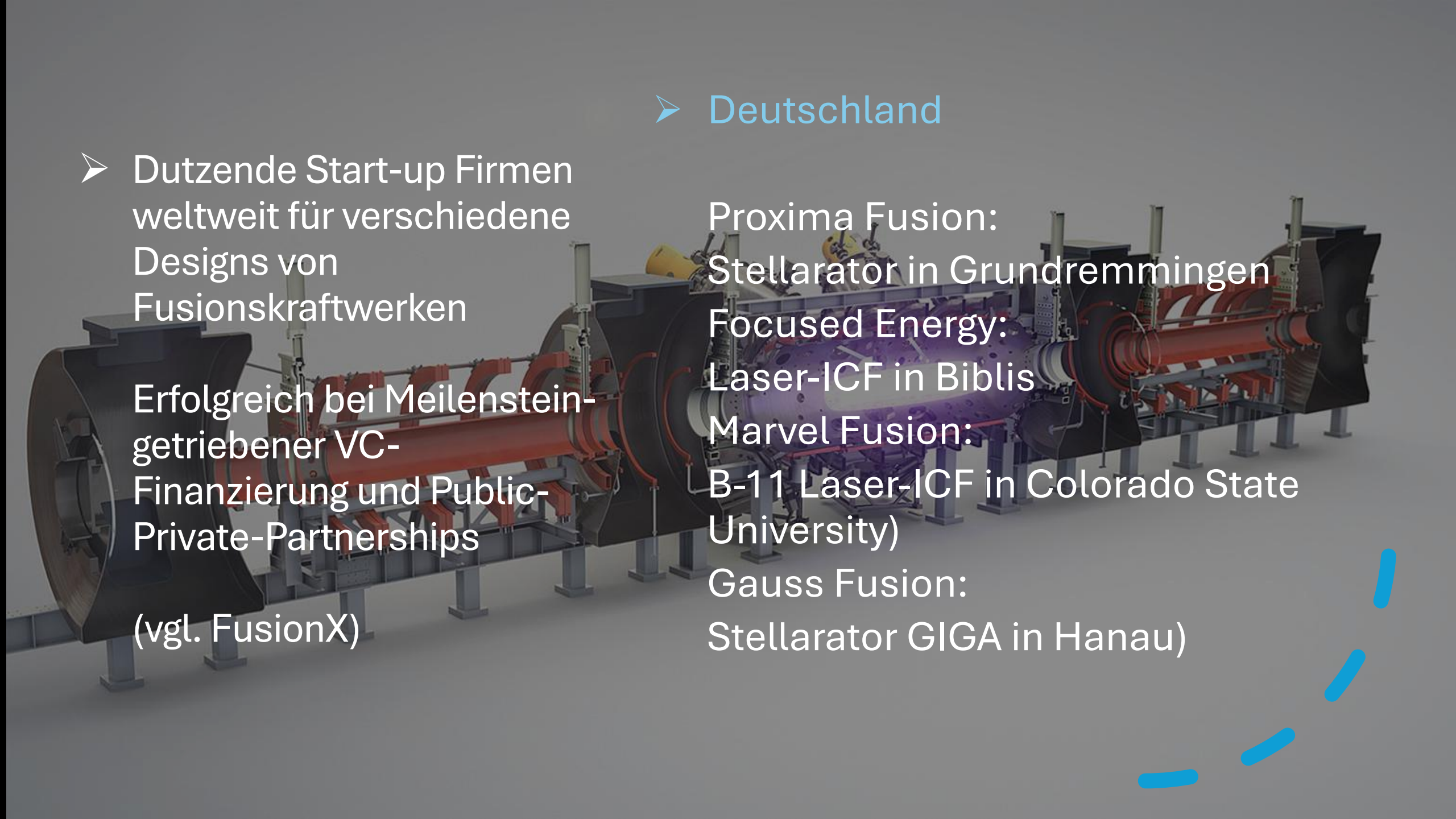
- Kernfusion Q>1 wird als machbar eingestuft (> 10 Jahre)
- Verschiedene Reaktorkonzepte
  - **Magnetic-confinement fusion (MCF): Tokamak, Stellarator**
  - **Inertial-confinement fusion (ICF)**
    - **Laser-driven ICF**
    - **Accelerator-driven ICF**
- BMBF-Förderung 1 G€ bis 2028 (Nachwuchstalente, Basistechnologien)
- **Masterplan Bayern 100 M€ bis 2028** (6 Lehrstühle, 20 Nachwuchsgruppe)
  - (i) **Demonstrationskraftwerk:** Fusion-ready Stellarator (IPP)
  - **(ii) Bavarian Fusion Cluster:** Ökosystem Fusionsforschung „alle Potenziale nutzen“
  - (iii) **Ausbildungsoffensive:** Forschung und Industrie



Horvath, A., Rachlew, E. - Horvath, A., Rachlew, E. Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities. Ambio 45, 38–49 (2016)

Bavarian Fusion Cluster
Kernfusion Kraftwerk
weitere Produkte
Invention
Innovation
Technology Readiness Level
(Grundlagenforschung → Entwicklung → Umsetzung)
acatech
Bayerische Staatsregierung
MISSION KERNFUSION
PROF. DR. WÖRNER

StMWi



- Dutzende Start-up Firmen weltweit für verschiedene Designs von Fusionskraftwerken

  Erfolgreich bei Meilenstein-getriebener VC-Finanzierung und Public-Private-Partnerships

  (vgl. FusionX)

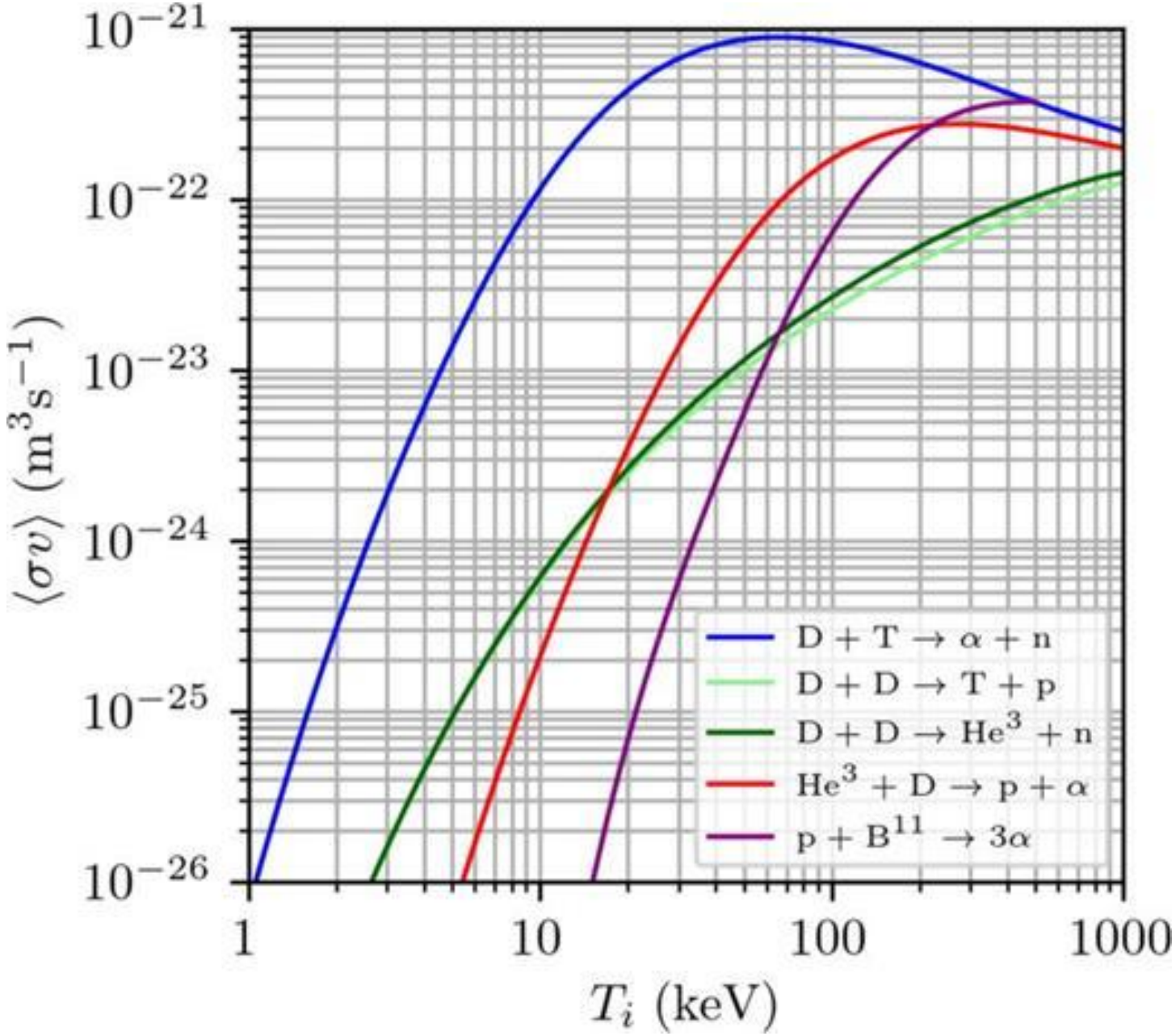
- Deutschland

  Proxima Fusion:
  Stellarator in Grundremmingen
  Focused Energy:
  Laser-ICF in Biblis
  Marvel Fusion:
  B-11 Laser-ICF in Colorado State University)
  Gauss Fusion:
  Stellarator GIGA in Hanau)

Fusionsreaktoren vs. Spaltungsreaktoren

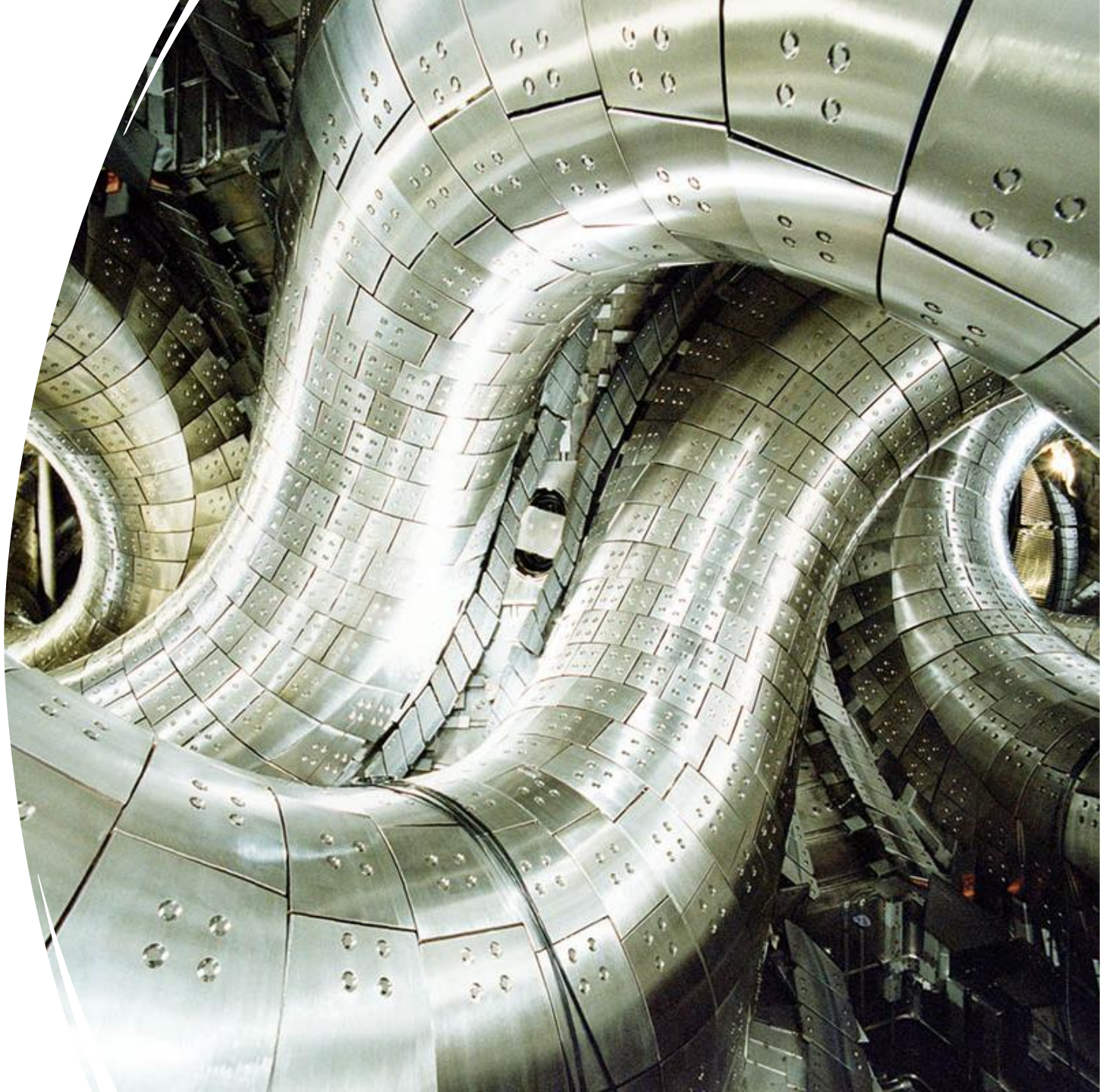
Aspekt	Fusion	Fission
Neutronenrate	höher	niedriger
Neutronenenergie	viel höher	niedriger
Strukturschäden	extrem	moderat
Wartungsintervall der Wand	Einige Jahre	Jahrzehnte
Abschirmung	sehr stark	moderat
Aktivierung	Strukturmaterialien	Brennstoff + Strukturmaterialien

Neutronenrate von Fusionsreaktoren:
Mehr als 10^{21} energiereiche Neutronen pro Sekunde


10^{-21}
10^{-22}
10^{-23}
10^{-24}
10^{-25}
10^{-26}
$\langle \sigma v \rangle$ ($\mathrm{m^3 s^{-1}}$)
1
10
100
1000
T_i (keV)
D + T → α + n
D + D → T + p
D + D → $\mathrm{He^3}$ + n
$\mathrm{He^3}$ + D → p + α
p + $\mathrm{B^{11}}$ → 3α

$p(^{11}B,\alpha)\alpha\alpha$+8.7 MeV

- **Vorteil: Keine Neutronen, keine Aktivierung des Wandmaterials**
- **Nachteil: Brenntemperatur 30mal höher als bei DT-Fusion**
- **Erfolgreiches Experiment von TAE in PPP am MCF Experiment LHD in Japan (Magee et al., Nature Comm. 2022)**



$$^{238}\mathrm{U} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{239}\mathrm{U} \xrightarrow[23.5\ \mathrm{min}]{\beta^-} {}^{239}\mathrm{Np} \xrightarrow[2.356\ \mathrm{d}]{\beta^-} {}^{239}\mathrm{Pu}$$

$$^{232}\mathrm{Th} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{233}\mathrm{Th} \xrightarrow[21.8\ \mathrm{min}]{\beta^-} {}^{233}\mathrm{Pa} \xrightarrow[26.98\ \mathrm{d}]{\beta^-} {}^{233}\mathrm{U}$$

OPEN ACCESS
IOP Publishing | International Atomic Energy Agency Nuclear Fusion
Nucl. Fusion 65 (2025) 036038 (21pp) https://doi.org/10.1088/1741-4326/adb504

Assessing the risk of proliferation via fissile breeding in ARC-class fusion power plants

John L. Ball[1,*], Ethan E. Peterson[1], R. Scott Kemp[2] and Sara E. Ferry[1]

[1] Plasma Science and Fusion Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, United States of America
[2] Laboratory for Nuclear Security and Policy, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, United States of America

E-mail: jlball@mit.edu

Received 18 April 2024, revised 15 January 2025
Accepted for publication 12 February 2025
Published 28 February 2025

Abstract

Construction of a nuclear weapon requires access to kilogram-scale quantities of fissile material, which can be bred from fertile material like U-238 and Th-232 via neutron capture. Future fusion power plants, with total neutron source rates in excess of $10^{20}\,n\,s^{-1}$, could breed weapons-relevant quantities of fissile material on short timescales, posing a breakout proliferation risk. The ARC-class fusion reactor design is characterized by demountable high temperature superconducting magnets, a FLiBe liquid immersion blanket, and a relatively small size (~4 m major radius, ~1 m minor radius). We use the open-source Monte Carlo neutronics code OpenMC to perform self-consistent time-dependent simulations of a representative ARC-class blanket to assess the feasibility of a fissile breeding breakout scenario. We find that a significant quantity of fissile material can be bred in less than six months of full power operation for initial fertile inventories ranging from 5 to 50 metric tons, representing a non-negligible proliferation risk. We further study the feasibility of this scenario by examining other consequences of fissile breeding such as reduced tritium breeding ratio, extra heat from fission and decay heat, isotopic purity of bred material, and self-protection time of irradiated blanket material. We also examine the impact of Li-6 enrichment on fissile breeding and find that it substantially reduces breeding rate, motivating its use as a proliferation resistance tool.

Keywords: ARC, proliferation, fissile, fertile, breeding, FPP

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

* Author to whom any correspondence should be addressed.

Original Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Proliferation

- Risikoanalyse (Ball et al. 2025)
- Waffenfähiges Material (WUM) in GW-Reaktoren binnen weniger Monate darstellbar
- Ausschluß von mißbräuchlicher Verwendung durch Vorgaben:
  - Li-6 Anreicherung im Tritium-Brutmaterial
  - Anforderungen an Reinheit der Materialien für Wand/Blanket

Aspekte der Fusionsenergie

⚛ Kernphysik
- Nukleare Wirkungsquerschnitte
- Plasmaeinschluß & MHD Stabilität
- Lawson Kriterium

🌍 Umwelt
- Keine Emission von CO_2
- Keine langlebigen radioaktiven Isotope
- Geringe Brennstoffmassen

🏭 Reaktorbetrieb
- Tritiumbrüten-Kreislaufprozess
- Neutronenresistente Materialien
- Robotische Wartung und Diagnose

💶 Marktfähigkeit
- CAPEX / Marktdesign
- Indirekte Kosten
- Wettbewerb mit EE
- Isotopenaufbereitung

☢ Strahlungsrisiken
- 14 MeV „harte“ Neutronen
- Materialaktivierung
- Abschirmung und Kühlbedarf

⚖ Proliferation
- Waffenfähiges Material
- Tritiumfreisetzung
- Aktivierung durch Impuritäten

📜 Rechtliche Rahmenbedingungen
- Lizensierung
- Betriebsgenehmigungen
- Transmutation
- Radioaktiver Abfall
- Sicherheit
- Öffentliche Akzeptanz

Fusion viability = Physics × Engineering × Economics × Policy

Zusammenfassung

- Steigender Strombedarf für BIP-Wachstum und KI-Datenzentren
- Fusion als resiliente Grundlastversorgung in einem hybriden Energiesystem mit erneuerbaren Energien
- Fusionsexperimente werden Q=10 Betriebsbedingungen in absehbarer Zeit technisch realisieren
- Zahlreiche zu überwindende Hürden für den Fusionsbetrieb: Tritiumbrüten, thermisches Design, Neutronenaktivierung, Realzeit-Plasmakontrolle, usw.
- Mit PPPs werden die Voraussetzungen für die industrielle Skalierung geschaffen
- Spill-over Technologien
  - Hochtemperatur-Supraleiter
  - Hochleistungs-Laseroptiken
  - Vakuumtechnologie, strahlenharte Elektronik und Diagnosesysteme, robotische Wartung
  - Plasmakontrolle für Anwendungen (Oberflächen, neue Materialen, Nanostrukturen für Halbleiterchips)
- Kernchemische Anlagen in der Peripherie von Fusionskraftwerken und ihre Risiken müssen mitgedacht werden. Sie sind essentiell für
  - Isotopenaufbereitung der Brennstoffe und Brutmaterialien
  - Lagerung und Transport kurzlebiger radioaktiver Isotope
  - Transmutation von radioaktivem Abbrand (ggfls. auch Umwandlung langlebiger „Abfälle“ von Spaltungsreaktoren)
- Nicht vernachlässigbares Proliferationsrisiko
- Hohe Entwicklungskosten (vgl. Gauss Fusion GIGA mit 18 Milliarden Euro) bei ungewissem CAPEX bedeuten hohes ökonomisches Risiko, das durch die Verwertung von Spill-over Technologien verringert wird