

Fra havdypet til verdensrommet



Terje Sæhle, M.D., M.Sc., Ph.D.

Photo: Colourbox

Hyperbar medisin

Dykkemedisin



Høyfjellsmedisin



Hypobar medisin

Flymedisin



Romfartsmedisin



Ekstremmedisin

Hyperbar medisin

Dykkemedisin



Hypobar medisin

Høyfjellsmedisin



Flymedisin



Romfartsmedisin



Eksosfære

Termosfære



Mesosfære

Stratosfære

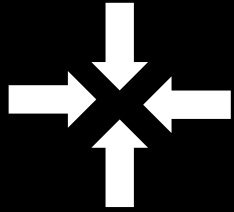


Troposfære



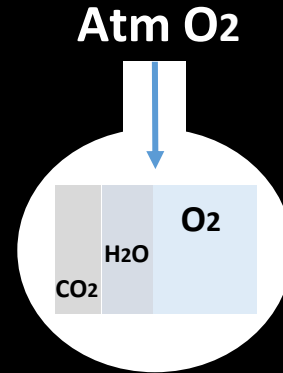
Atmosfærisk trykk

$$P_h = P_0 e^{-mgh/kT}$$



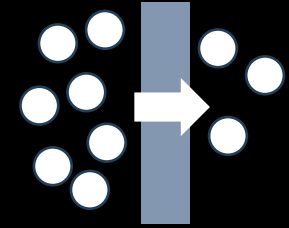
Den alveolære gasslikningen

$$P_{AO_2} = F_{iO_2} (P_{ATM} - P_{H_2O}) - (P_aCO_2/R)$$



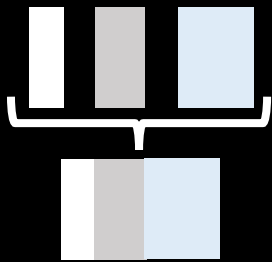
Ficks diffusjonslov

$$V \propto A/T \times D \times (P_1 - P_2)$$



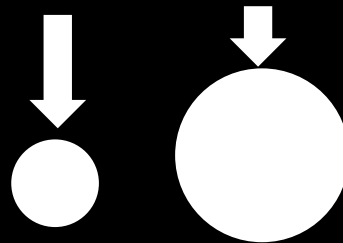
Daltons lov

$$P_{tot} = P_a + P_b + P_c + P_d \dots$$



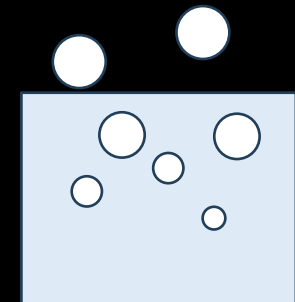
Boyles lov

$$P_1V_1 = P_2V_2$$



Henrys lov

$$C = kP$$



Dykkemedisin



Hyperbart miljø

- *Gassfysiologi ved høyt trykk*
 - *Nitrogennarkose*
 - *Oksygentoksisitet*
 - *HPNS*
 - *CO₂ retensjon og toksisitet*
- *Trykkendring og dekompresjon*
 - *Barotraume*
 - *Trykkfallsyke*
 - *Arteriell gassemboli (AGE)*

Sensoriske og kognitive effekter

- *Visuelle og auditive forstyrrelser*
- *Kognitive effekter*
- *Spatial desorientering*

Termisk stress og væskebalanse

- *Hypotermi, hypertermi*
- *Dykkerdiurese og dehydrering*
- *IPE (immersjonslungeødem)*

Biomekaniske effekter

- *Hydrostatiske krefter*
- *Oppdrift og væskeforflytning*
- *Økt metabolske krav*

Operasjonell og habitatrelatert risiko

- *Havstrømmer*
- *Farlige marine organismer*
- *Innestenging, tap av navigasjon*
- *Utstyrsfeil*
- *Drukningrisiko*
- *Distanse fra overflate*

Høyfjellsmedisin



Hypobart miljø

- *Hypobar hypoksi*
 - $\downarrow pO_2$, $\downarrow sO_2$, $\downarrow pCO_2$
 - *Hypoxia-Inducible Factor (HIF)*
- *Fysiologisk akklimatisering*
 - *Hyperventilasjon og økt puls*
 - *Bikarbonatutskillelse i urin*
 - *økt O₂ frigjøring fra hemoglobin*
 - *Erytropoiese*
 - *Angiogenese og kapillærtetthet*
- *Patologiske komplikasjoner*
 - *AMS (høydesyke)*
 - *HACE (hjerneødem)*
 - *HAPE (lungeødem)*
 - *Netthinneforandringer*
 - *CMS (kronisk fjellsyke)*

Sensoriske og kognitive effekter

- *White-out, redusert nattsyn*
- *Kognitive effekter*
- *Psykologisk stress og utmattelse*

Termisk stress og væskebalanse

- *Kulde og hypotermi*
- *Windchill-effekt*
- *Tørr luft og dehydrering*
- *Kuldeindusert diurese*

Stråling

- *Økt UV-intensitet med høyde*
- *Kosmisk stråling i ekstreme høyder*
- *Snøblindhet (UV-indusert keratitt)*
- *Albedo-effekt fra snø og is*

Operasjonell og habitatrelatert risiko

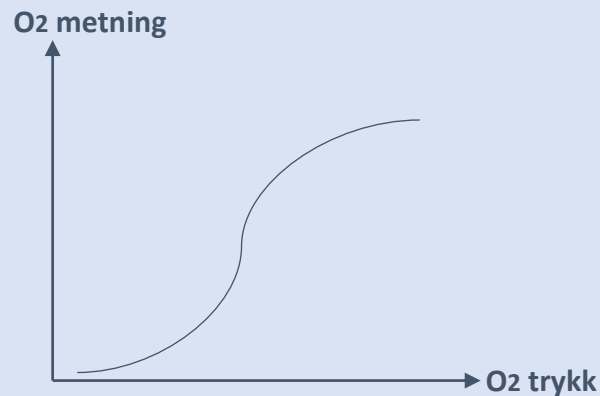
- *Snøras og isras*
- *Isolasjon og redningslogistikk*
- *Lav tilgang til medisinske ressurser*
- *Ozonforurensning i troposfæren*

Flymedisin



Hypobart miljø

- Trykkendring og dekompresjon
 - Barotraume
 - Trykkfallsyke
- Hypobar eksponering
 - Hypobar hypoksi
 - ↓ sO₂



Sensoriske og kognitive effekter

- Visuelle forstyrrelser
- Sanseillusjoner
- Fatigue og human factors

Termisk stress og væskebalanse

- Hypotermi/hypertermi
- Tørr kabinluft

Biomekaniske & gravitasjonelle effekter

- Vibrasjon
- G-krefter
- G-drakter og anti-G manøvrer

Stråling

- Ikke-ioniserende
- Ioniserende

Operasjonell og habitatrelatert risiko

- Isolasjon og medisinsk beredskap
- Toksisk eksponering
- Luftfartsulykke, turbulens
- Funksjonsvurdering og inkapasiteringsrisiko

Romfartsmedisin



Hypobart miljø

- *Trykkendring og dekompresjon*
 - *Barotraume*
 - *Trykkfallsyke*
- *Hypobar eksponering*
 - *Hypobar hypoksi*
 - *Ebullisme*

Sensoriske og kognitive effekter

- *Sanseillusjoner, SAS*
- *Fatigue, forstyrret circadisk rytme, ↓søvn*

Termisk stress og væskebalanse

- *Ekstreme temperaturer, ↓konveksjon*
- *Dehydrering*

Unormal gravitasjonell påvirkning

- *Mikrogravitasjon (vektløshet)*
- *Partiell gravitasjon*
- *G-krefter*

Stråling

- *Solstormer*
- *Galaktisk kosmisk stråling*
- *Van Allen belter*

Operasjonell og habitatrelatert risiko

- *Mikrometeoroider*
- *Psykologisk stress og sosial isolasjon*
- *Avstand fra jorden og lav ressurstilgang*
- *Utstyrsfeil og tap av livsstøttesystemer*
- *Toksisk eksponering, månestøv, CO₂*

Romfartsmedisin



Hypobart miljø

Termisk stress

Mikrogravitasjon (vektløshet)

Stråling

Mikrometeoroider

Avstand fra jorden og lav ressurstillgang

Hypobart miljø

A photograph of an astronaut in a white spacesuit floating in space, with the Earth's blue and white atmosphere visible in the background.

Dekompresjon

- Barotraume
- Trykkfallsyke

Hypobare effekter

- Ebullisme
- Hypobar hypoksi

Termisk stress



Varmeoverføring i rommet

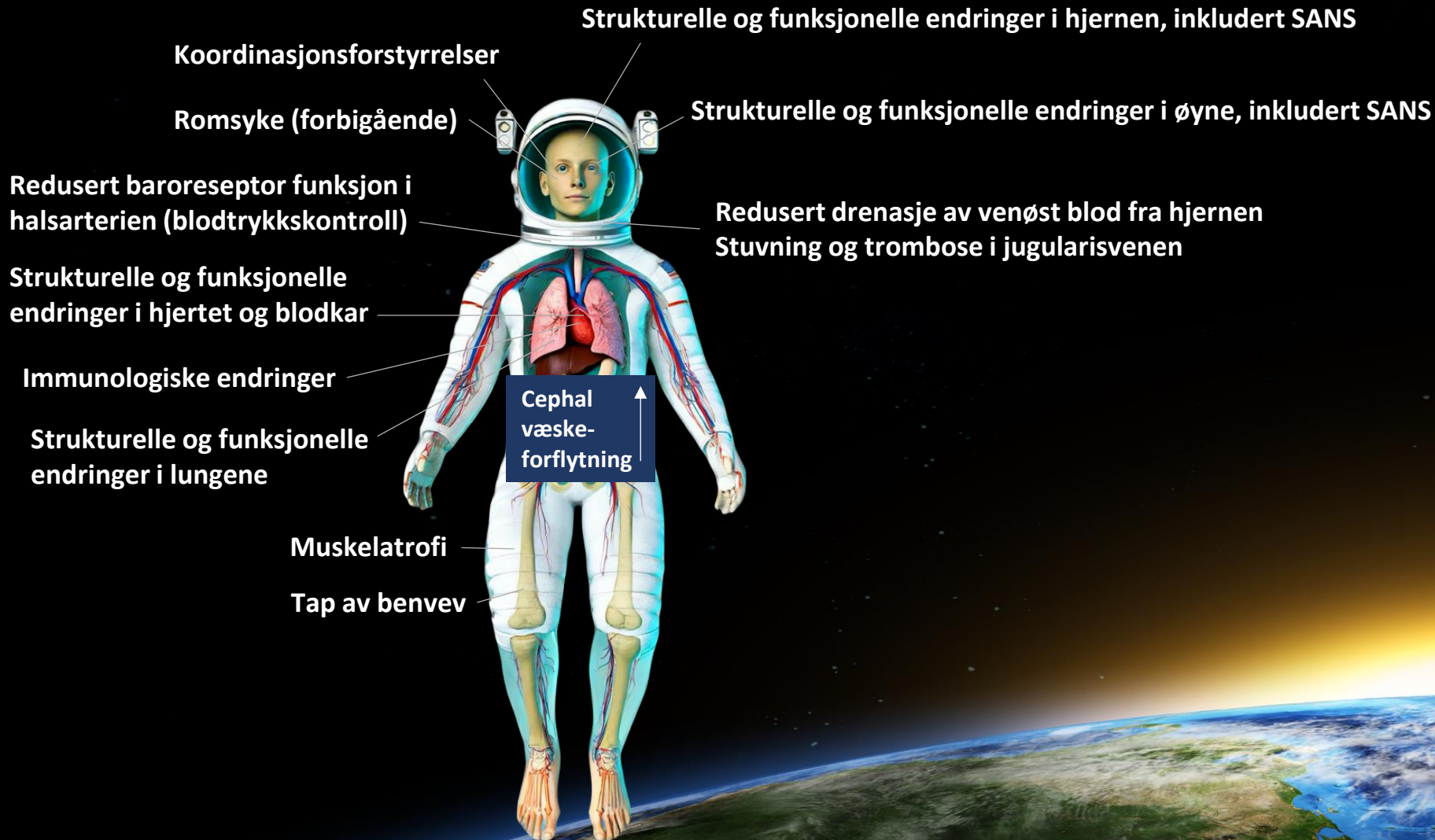
- Konveksjon
- Konduksjon
- Stråling

Mikrogravitasjon

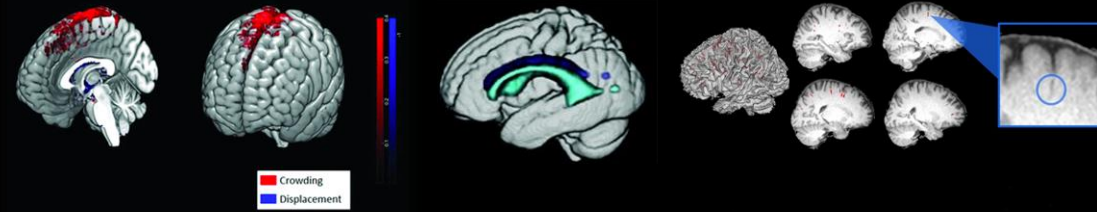


Time Lapse Video of Earth taken from the ISS (video courtesy of NASA)

Mikrogravitasjon



Mikrogravitasjon



Hupfeld KE et al. 2022
 Hupfeld KE et al. 2020
 Roberts DR et al. 2019

Strukturelle og funksjonelle endringer i hjernen, inkludert SANS

Koordinasjonsforstyrrelser

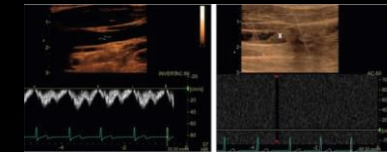
Romsyke (forbigående)

Strukturelle og funksjonelle endringer i øyne, inkludert SANS



Ong J et al. 2023

Redusert drenering av venøst blod fra hjernen Stuvning og trombose i jugularisvenen



Kim et al 2021
 Auñón-Chancellor et al 2020
 Pavela et al 2022

Redusert baroreseptor funksjon i halsarterien (blodtrykkskontroll)

Strukturelle og funksjonelle endringer i hjertet og blodkar

Immunologiske endringer

Strukturelle og funksjonelle endringer i lungene

Cephal
 væske-
 forflytning

Muskelatrofi

Tap av benvev

NASA Human Research Roadmap. VIIP/SANS risk

		Low Earth Orbit (6 months)	Low Earth Orbit (1 year)	Lunar Visit (1 year)	Asteroid (1 year)	Planetary (3 years)
Vision Impairment and Intracranial Pressure	In-Mission Risk	Accepted	Accepted	Accepted	Requires Mitigation	Requires Mitigation
	Post-Mission Risk	Accepted	Accepted	Accepted	Requires Mitigation	Requires Mitigation

Source: Human System Risk Summary Charts, HMTA, January 2015.

Legend: High consequences (Red), Low to medium consequences (Yellow), Very low to low consequences (Green)

Stråling



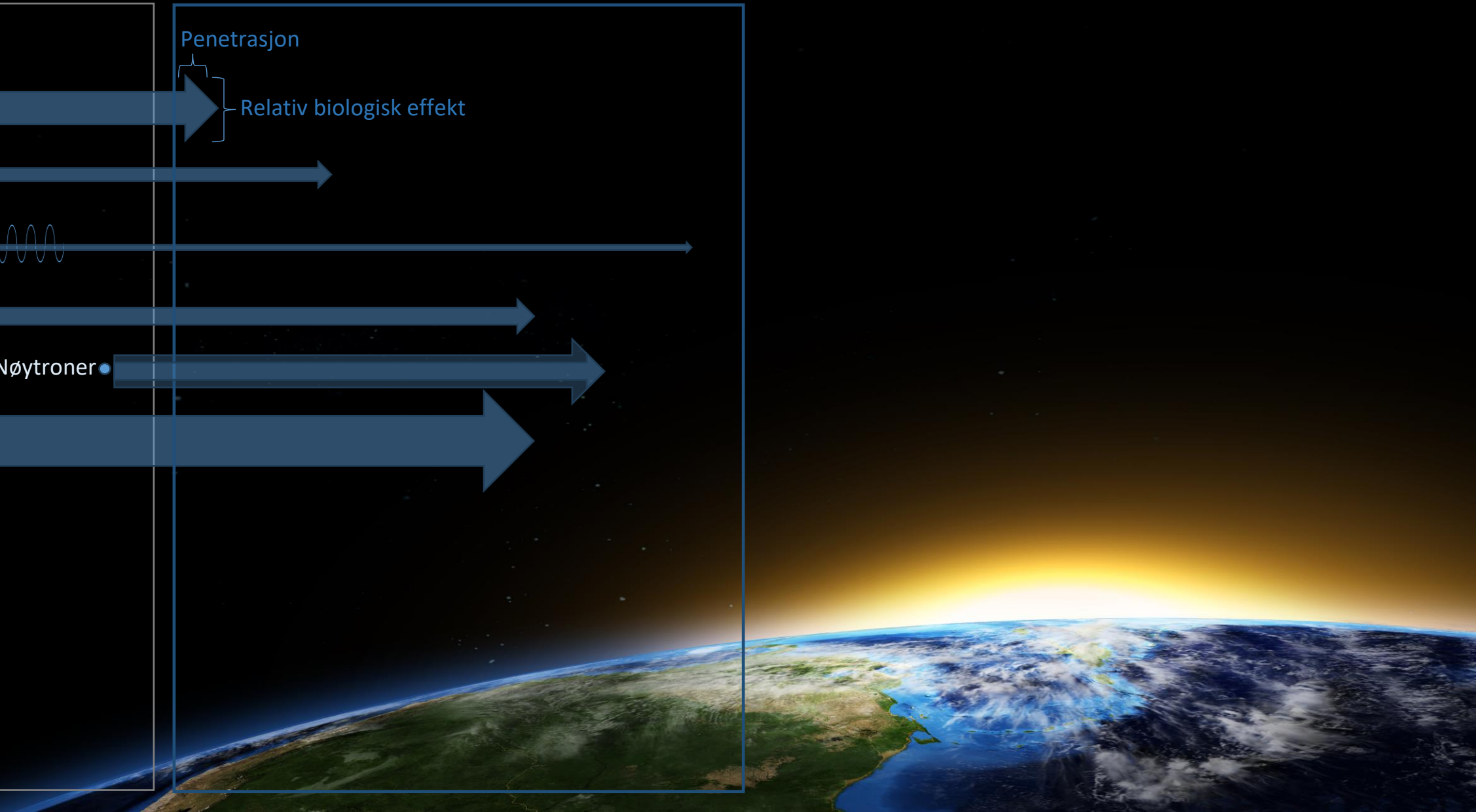
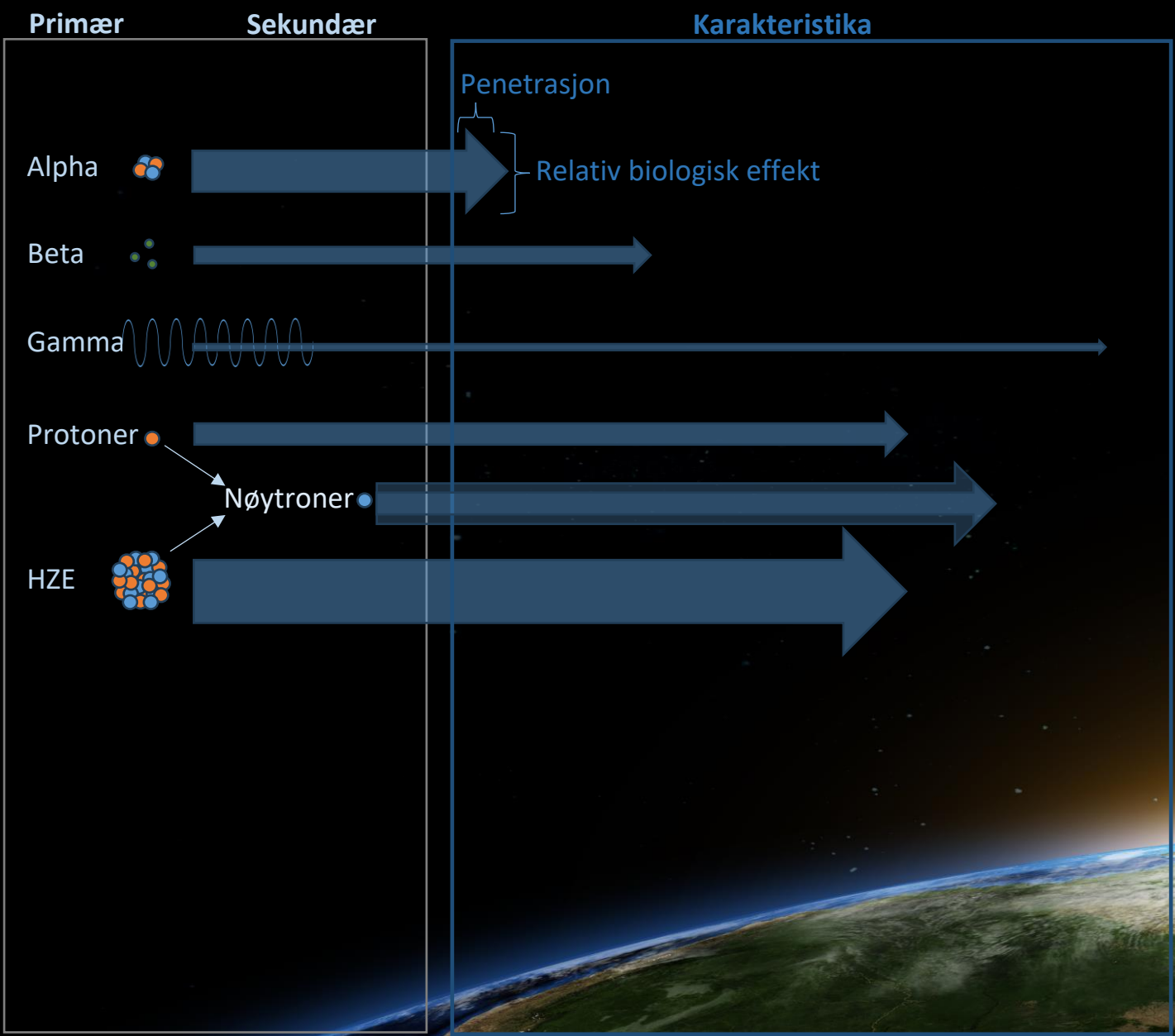
Solpartikkelhendelser (SPE)

Van Allen beltene

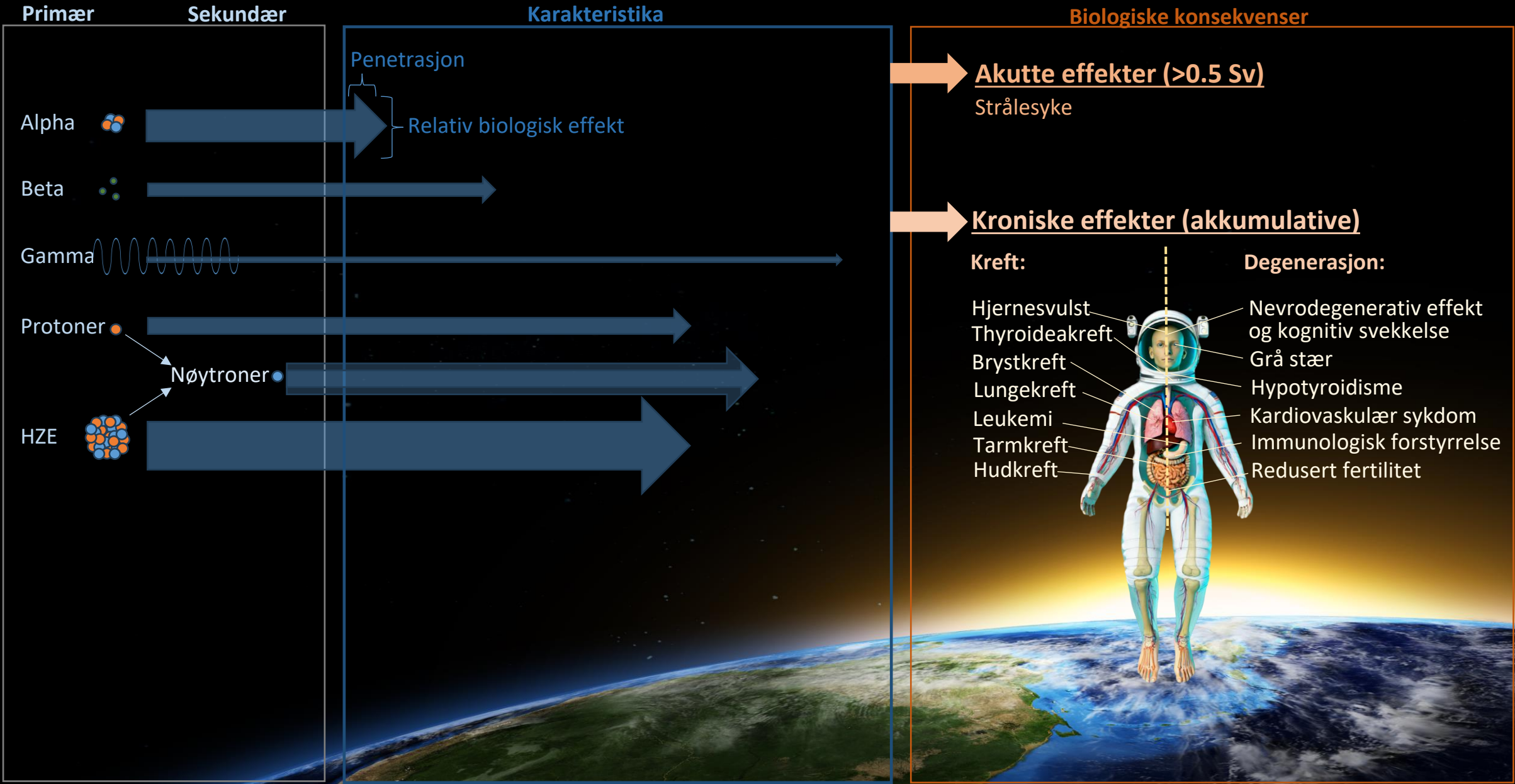
Kosmisk galaktisk stråling (GCR)



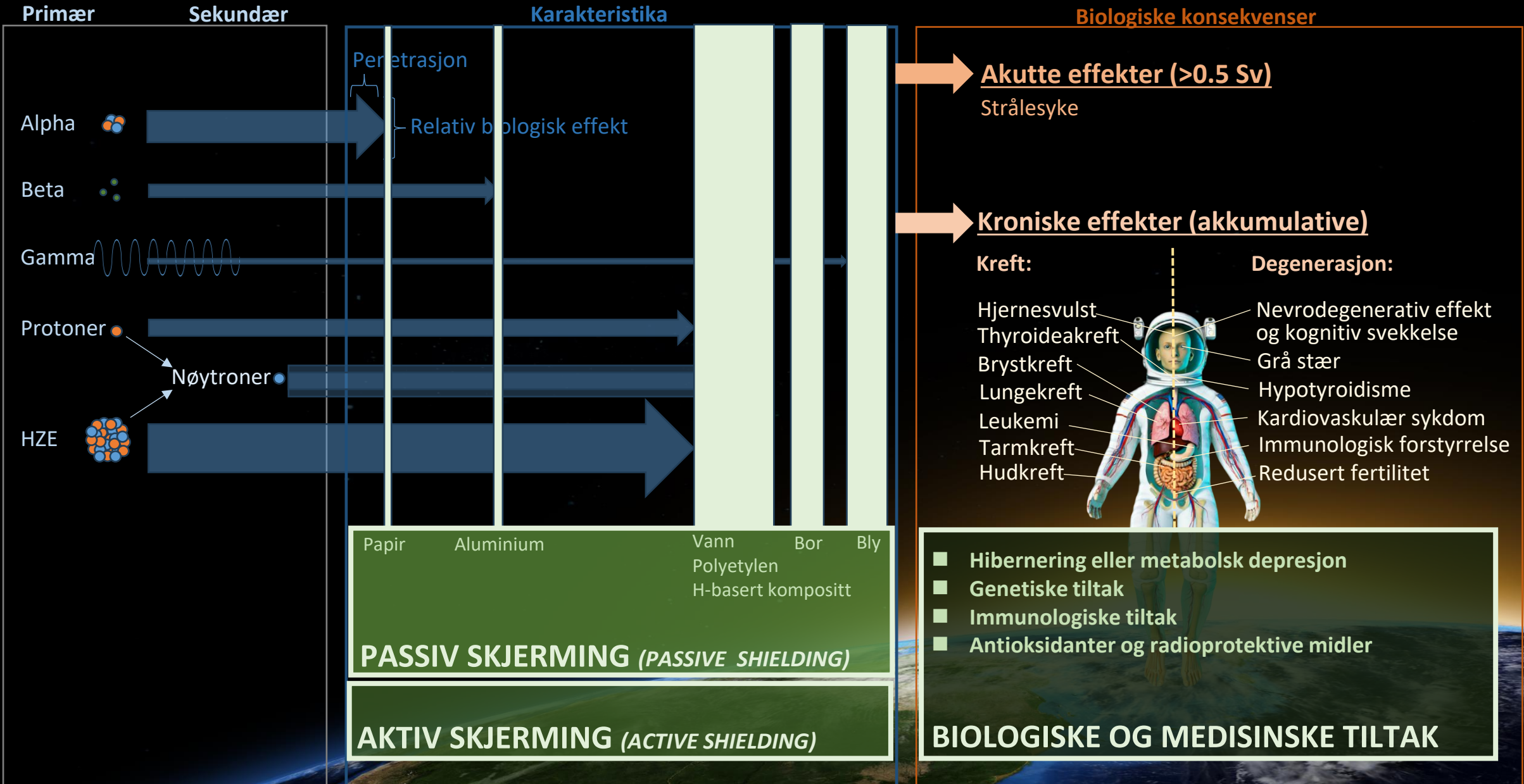
Stråling



Stråling



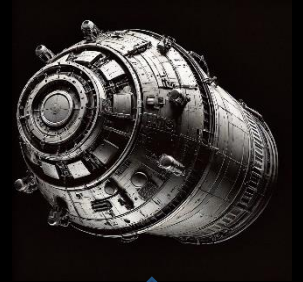
Stråling





Isolasjon

- Sosiale utfordringer (f.eks. interpersonelle konflikter, kjedsomhet)
- Endret sirkadisk rytme, søvnforstyrrelser
- Lokal toksisk eller skadelig eksponering (f.eks. kjemisk lekkasje, månestøv, CO₂ lommer)
- Avhengighet av livsstøttesystemer

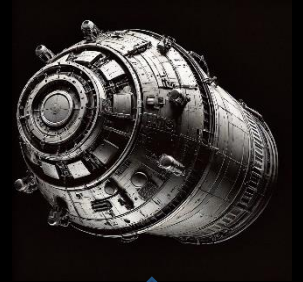


Avstand fra jorden

- Psykologiske utfordringer
- Begrenset forsyninger, inkludert mat og vann
- Begrenset medisinsk og kirurgisk beredskap
- Forsinket kommunikasjon/telemedisin

Isolasjon

- Sosiale utfordringer (f.eks. interpersonelle konflikter, kjedsomhet)
- Endret sirkadisk rytme, søvnforstyrrelser
- Lokal toksisk eller skadelig eksponering (f.eks. kjemisk lekkasje, månestøv, CO₂ lommer)
- Avhengighet av livsstøttesystemer



Avstand fra jorden

- Psykologiske utfordringer
- Begrenset forsyninger, inkludert mat og vann
- Begrenset medisinsk og kirurgisk beredskap
- Forsinket kommunikasjon/telemedisin

