Tema 1

El dominio de la Física Nuclear

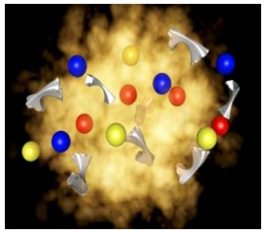
Asignatura de Física Nuclear

Curso académico 2012/2013

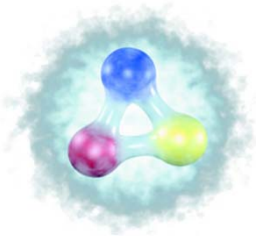
Universidad de Santiago de Compostela

El dominio de la Física Nuclear

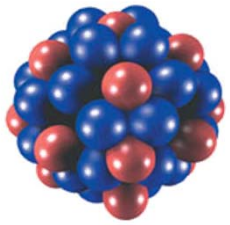
Estudio de la materia ligada por la interacción fuerte



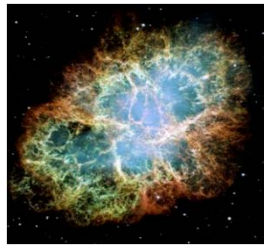
primeros instantes del Universo



estructura de los hadrones



estructura del núcleo atómico

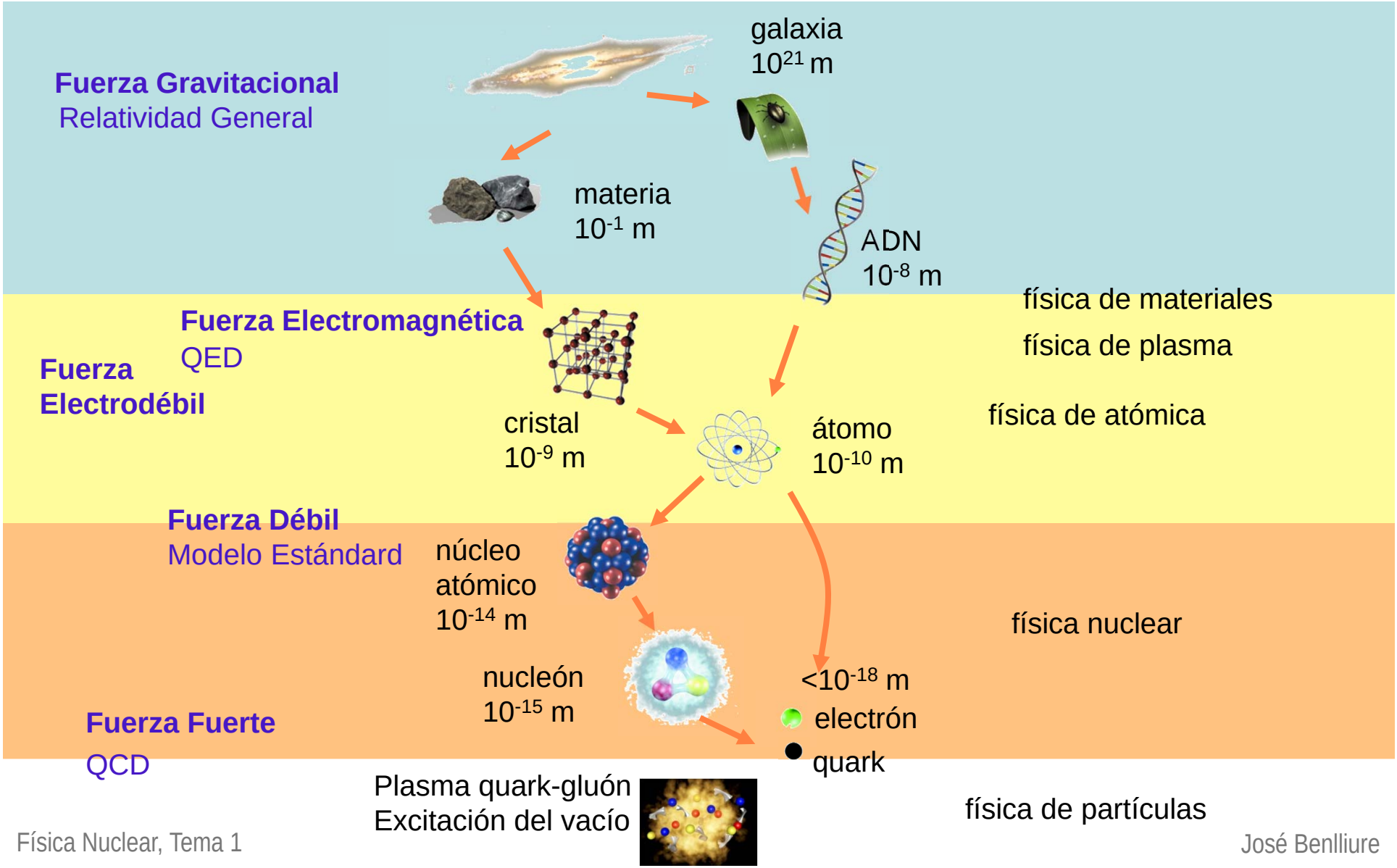


nucleosíntesis y evolución estelar

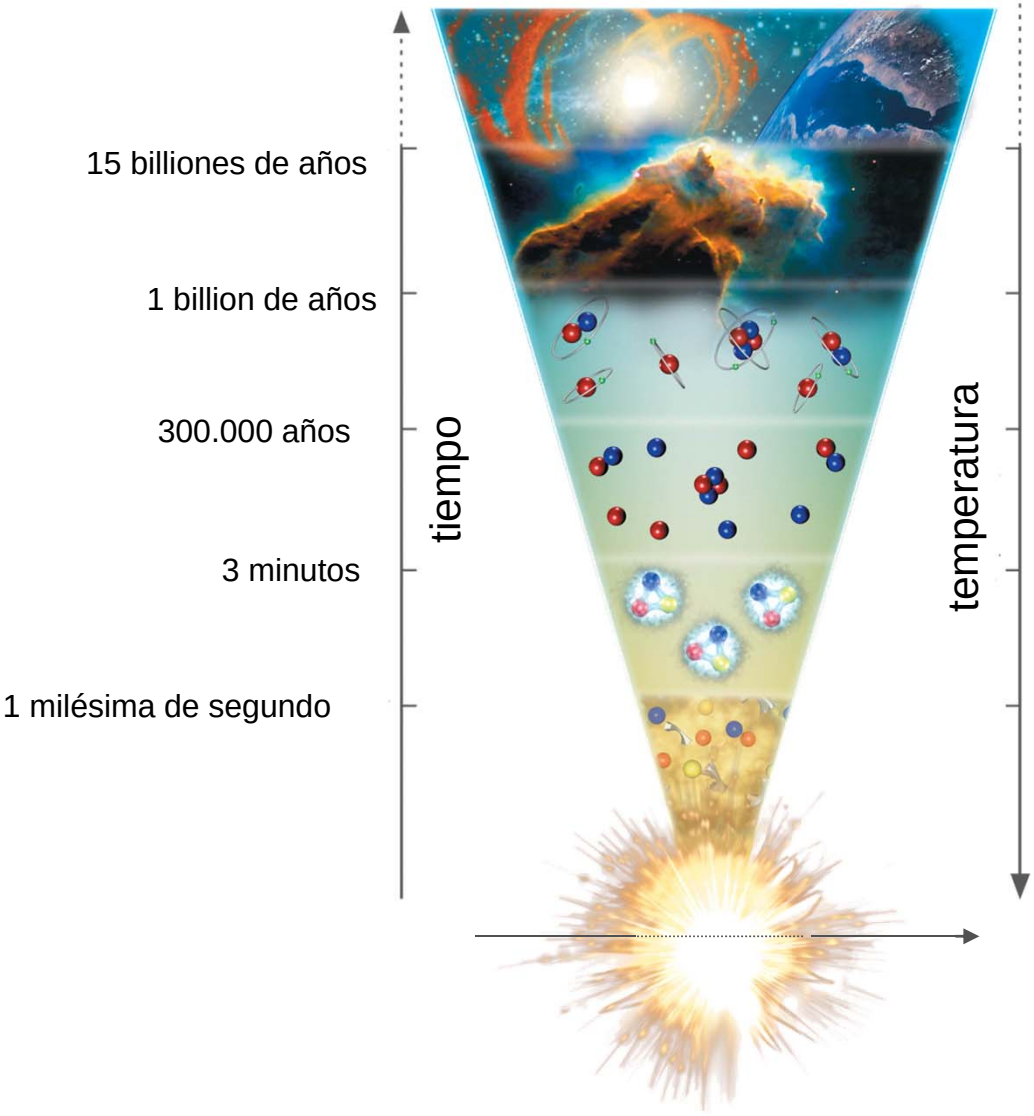
La respuesta a cuestiones fundamentales:

- ¿Cuál es la estructura interna de los hadrones?
- ¿Cómo es la fuerza que mantiene ligados a neutrones y protones dentro del núcleo atómico?
- ¿Cuál es el origen de los elementos en el cosmos?
- ¿Cuáles son las reacciones nucleares responsables de la evolución estelar?
- ¿Cuáles son las fases de la materia ligada por la interacción fuerte?

La estructura de la materia



Del mundo microscópico al macroscópico



materia nuclear infinita
(ecuación de estado)

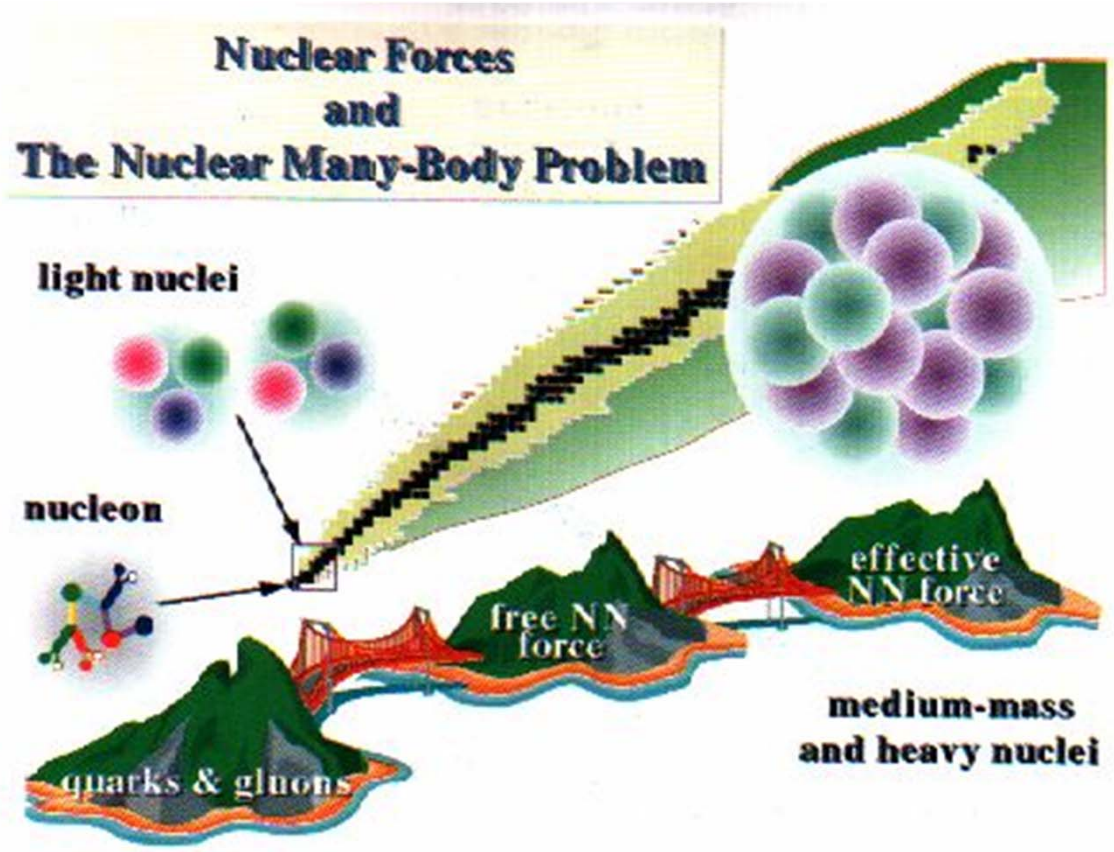
cuerpos estelares
(nucleosíntesis)

materia nuclear finita
(estructura nuclear)

materia hadrónica
(estructura hadrónica)

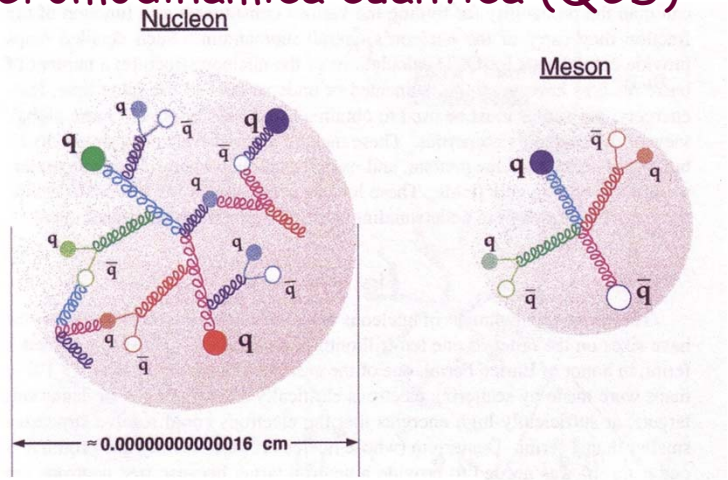
plasma de quarks y gluones
(fases de la materia nuclear)

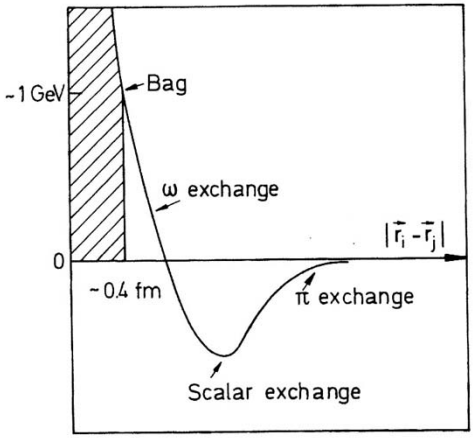
La fuerza nuclear



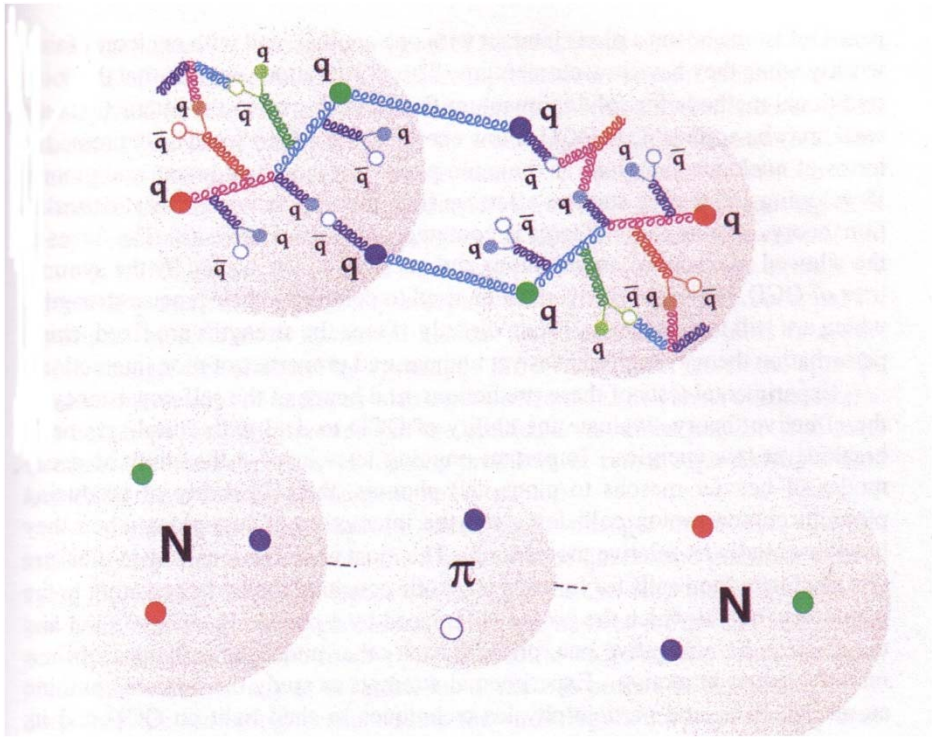
La fuerza nuclear

Cromodinámica cuántica (QCD)





Fuerzas fenomenológicas



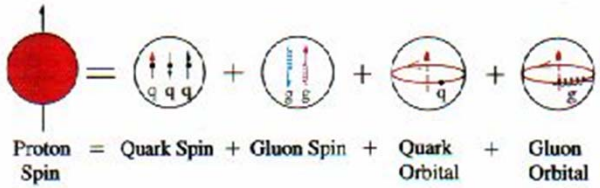
Teoría de intercambio de mesones de Yukawa

Principales temas de investigación en Física Nuclear

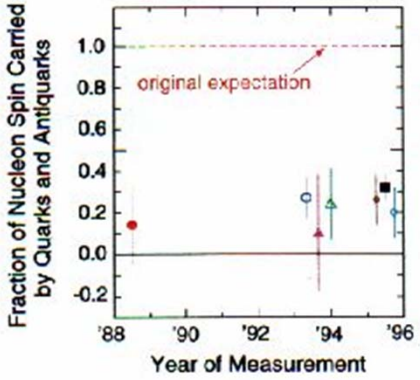
- estructura y dinámica de hadrones
  - ✓ sondas electromagnéticas: e^-, γ, μ,.. y hadrónicas: p,anti-p
- estructura y dinámica del núcleo atómico
  - ✓ isospín: haces de núcleos no estables
  - ✓ espín: haces de iones pesados
  - ✓ temperatura: haces de iones pesados
- fases de la materia nuclear
  - ✓ transición entre la materia nuclear y hadrónica: multifragmentación
  - ✓ transición entre la materia hadrónica y el plasma de quarks y gluones
- astrofísica nuclear
- interacciones fundamentales y simetrías
- aplicaciones

Estructura y dinámica de hadrones

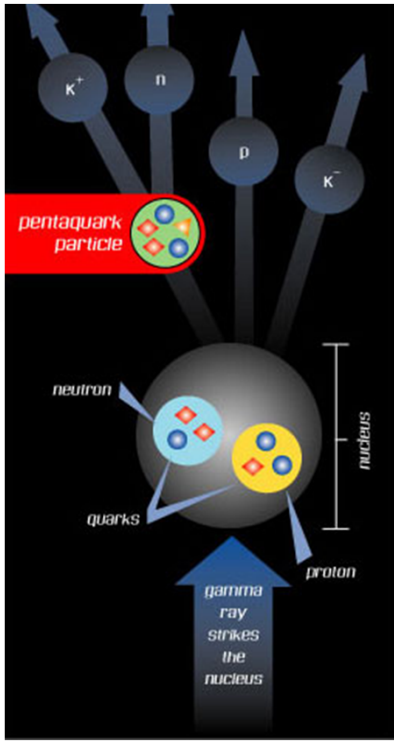
- masa de los hadrones:
  - ✓ confinamiento y simetría chiral



- espín de los hadrones:
  - ✓ espín de quarks y gluones
  - ✓ momento angular orbital



- tests de QCD
  - ✓ espectroscopía del charmonium (c-(anti)c)
  - ✓ estados ligados de gluones (glueballs)
  - ✓ estados ligados quark-antiquark-gluón (híbridos)

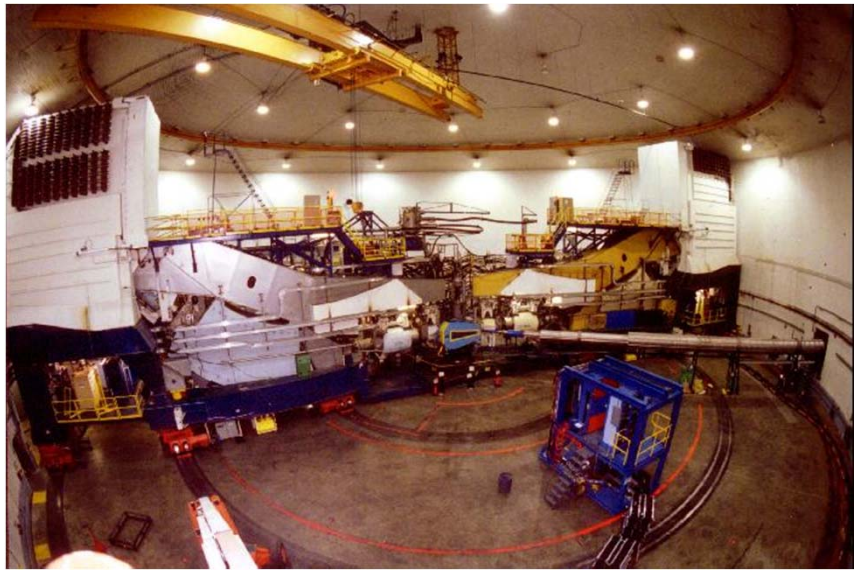


- distribuciones de carga y momentos electromagnéticos

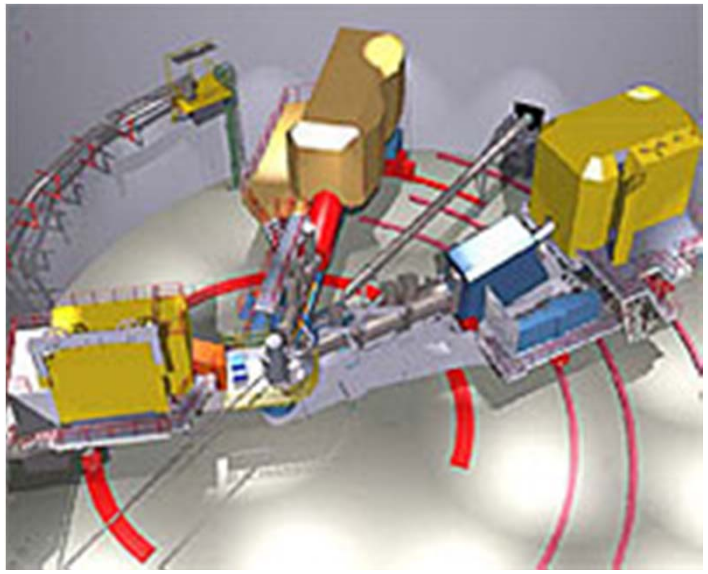
- sondas experimentales
  - ✓ sondas electromagnéticas e^-, γ, μ, ...
  - ✓ sondas bariónicas p, (anti)-p, K, π,...

Dispositivos experimentales:

Hall A CEBAF



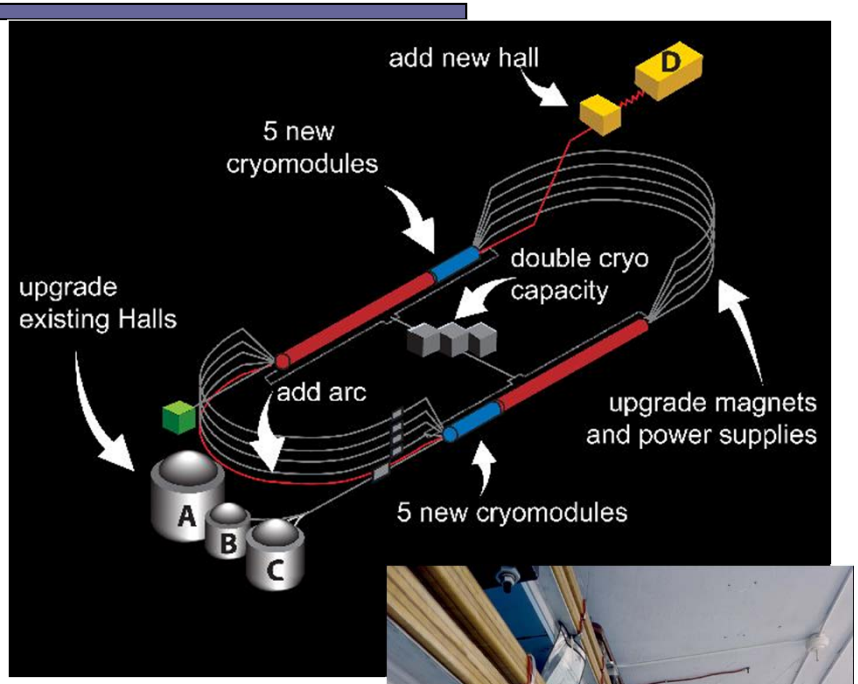
Hall C CEBAF



Estructura y dinámica de hadrones

Aceleradores

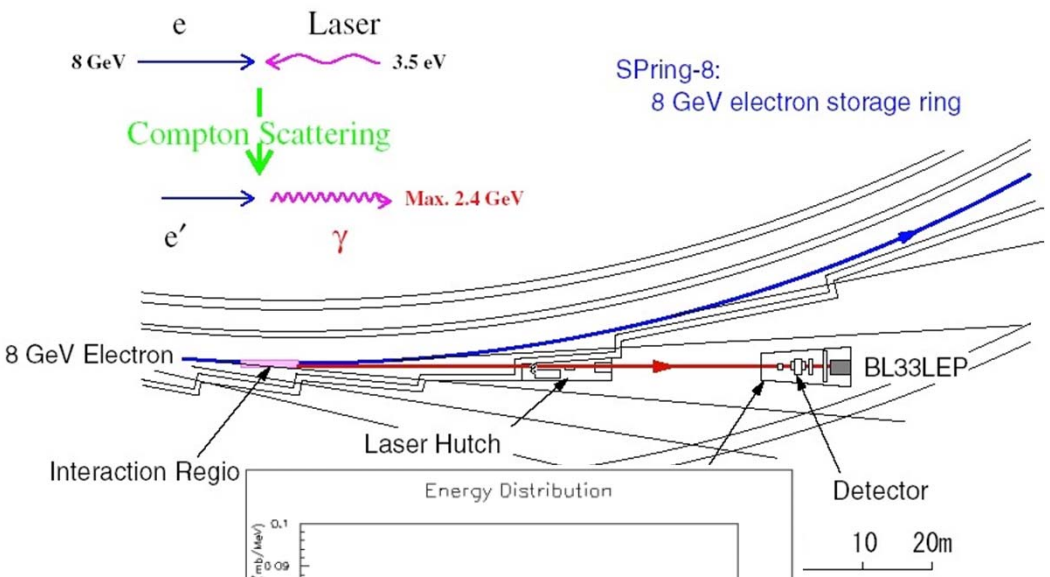
CEBAF (USA)

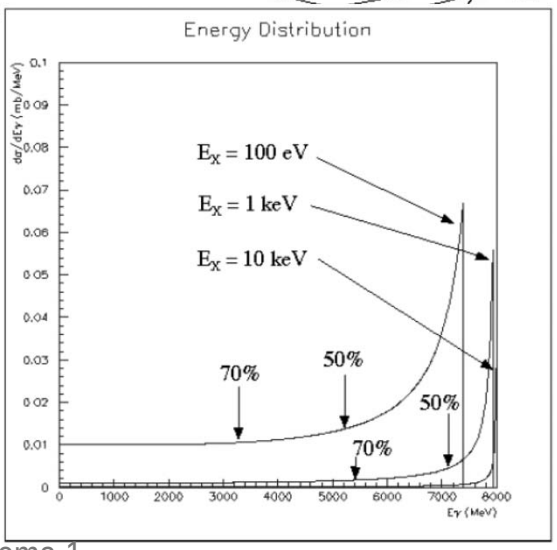


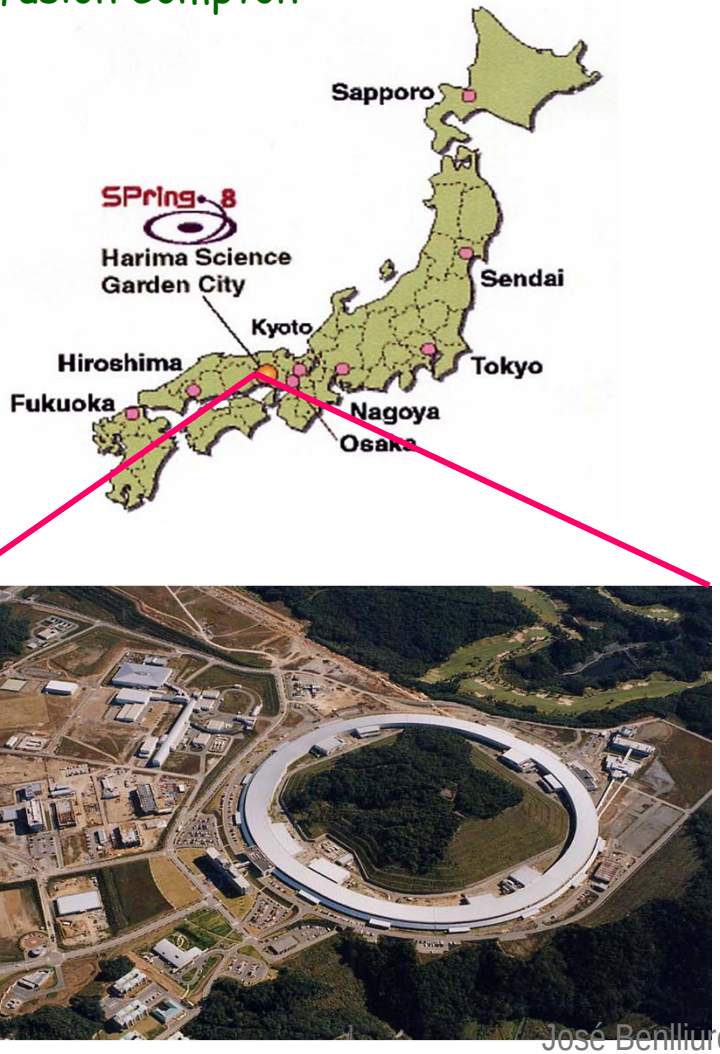
Estructura y dinámica de hadrones

Aceleradores

SPRING-8 (Japón), γ por retrodifusión Compton



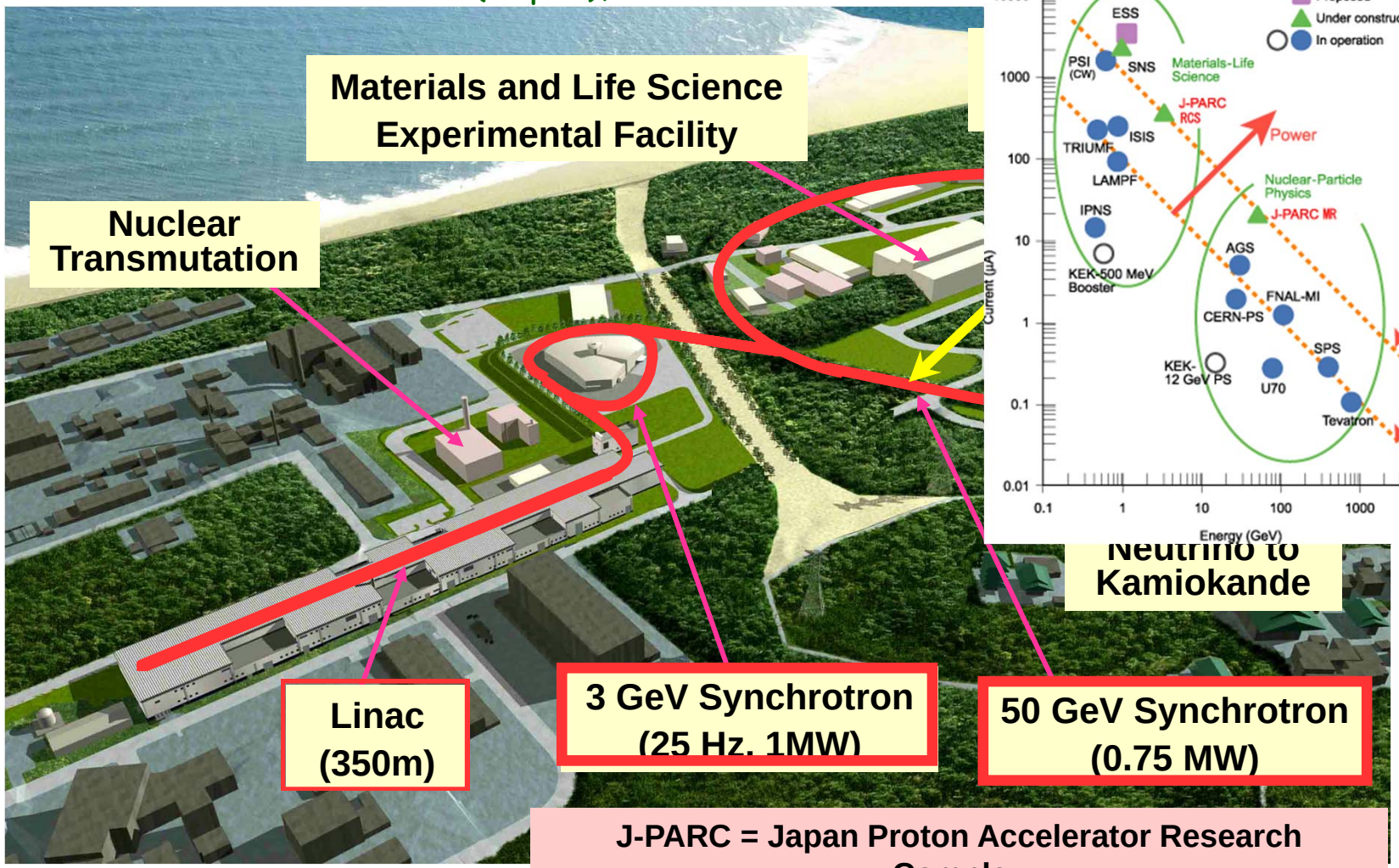


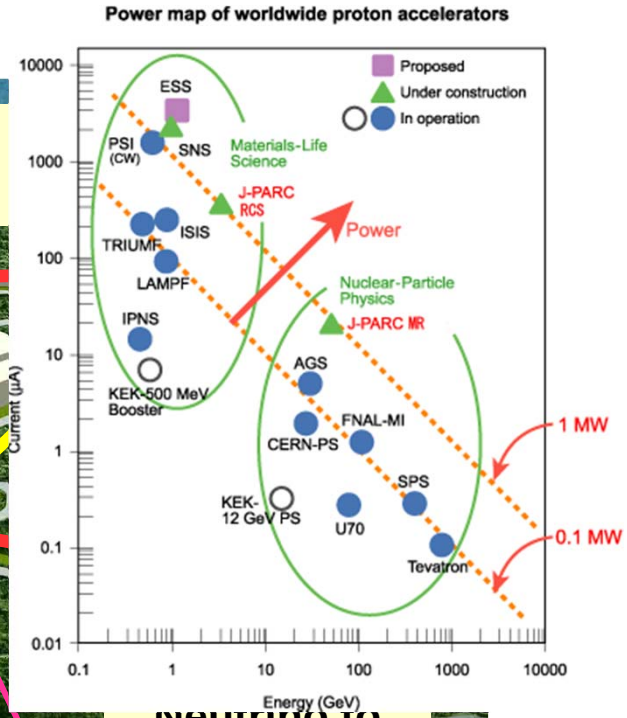


Estructura y dinámica de hadrones

Aceleradores

J-PARC (Japón), en construcción



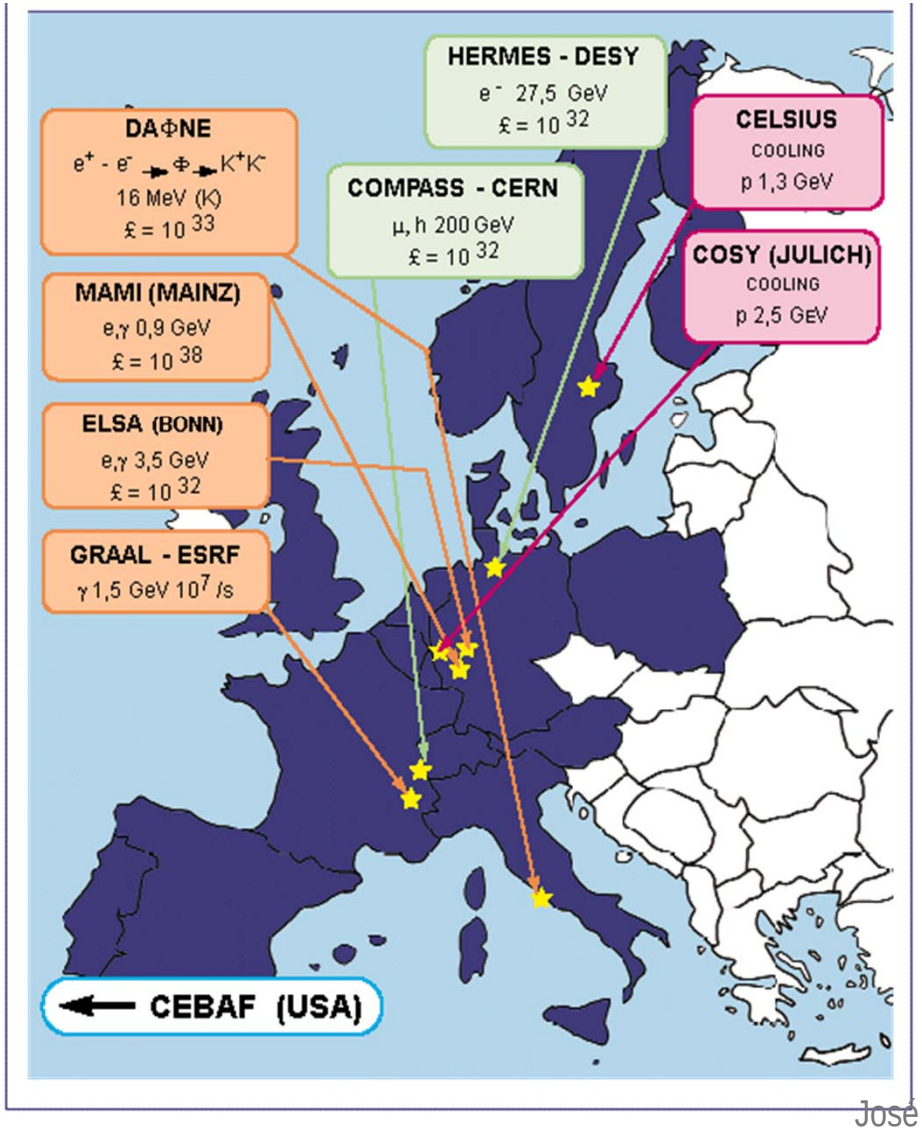


J-PARC = Japan Proton Accelerator Research Complex

Estructura y dinámica de hadrones

Dispositivos experimentales

Instalaciones en Europa

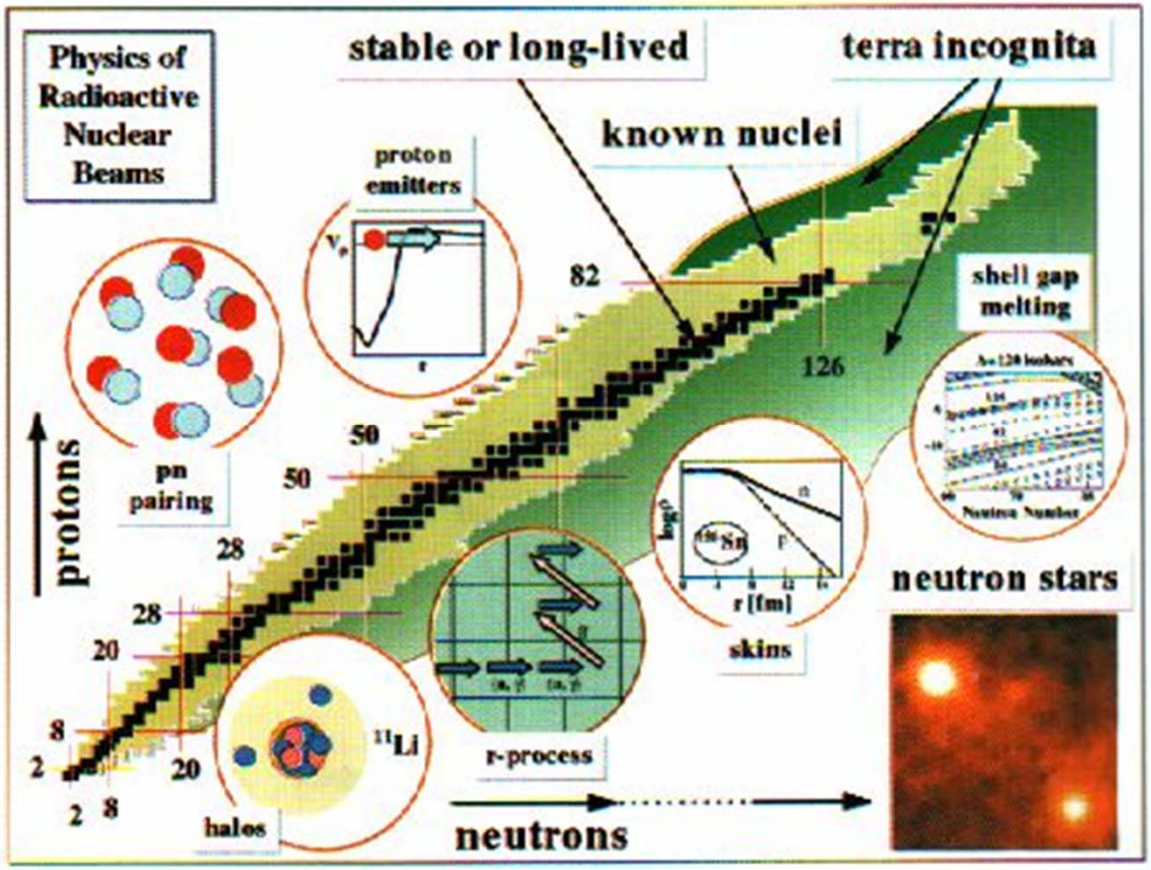


Estructura y dinámica nuclear

- núcleos lejos de la estabilidad: isospín
  - ✓ nuevas densidades de materia y radios: halos y pieles
  - ✓ nuevos tipos de radiactividad: 2p
  - ✓ modificación de la estructura de capas
- producción de núcleos superpesados
  - ✓ test del modelo de capas
- núcleos con alto espín
  - ✓ superfluidez
  - ✓ superdeformación
- núcleos con gran temperatura
  - ✓ modos resonantes
  - ✓ excitaciones en el contínuo (caos)
- sondas experimentales
  - ✓ iones pesados estables
  - ✓ núcleos exóticos

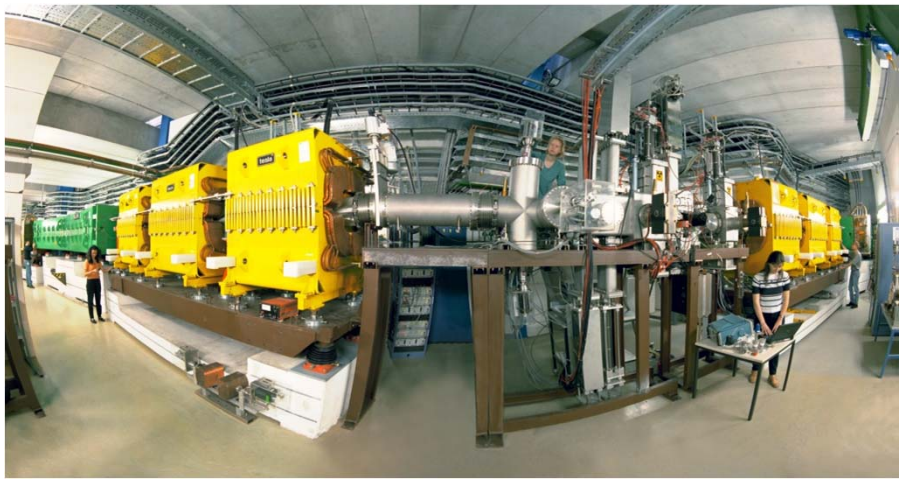
Estructura y dinámica nuclear

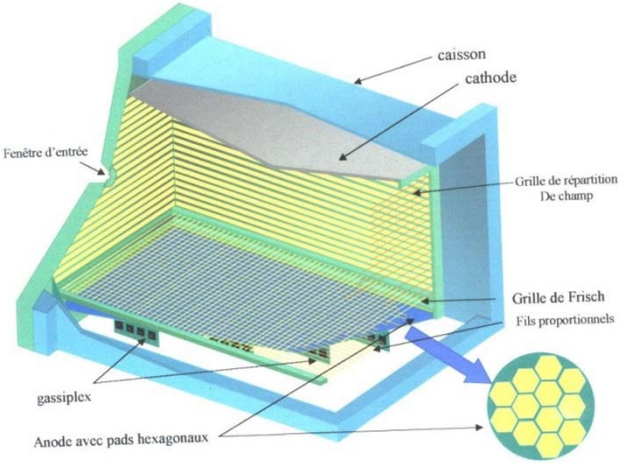
Nueva física lejos de la estabilidad:

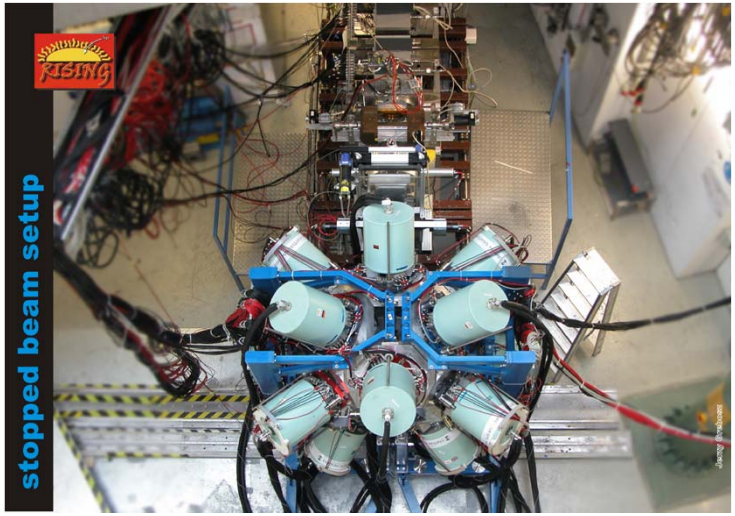


Estructura y dinámica nuclear

Dispositivos experimentales:

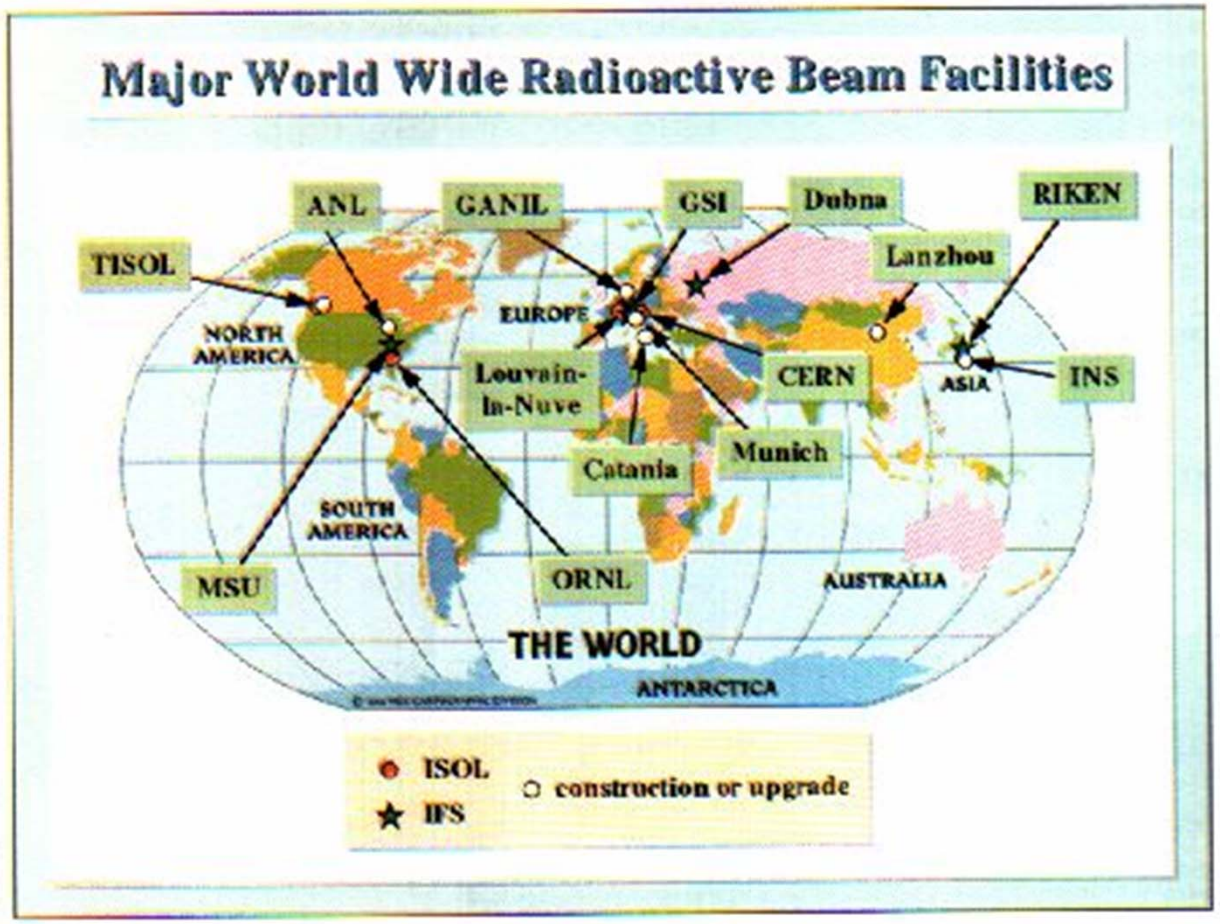






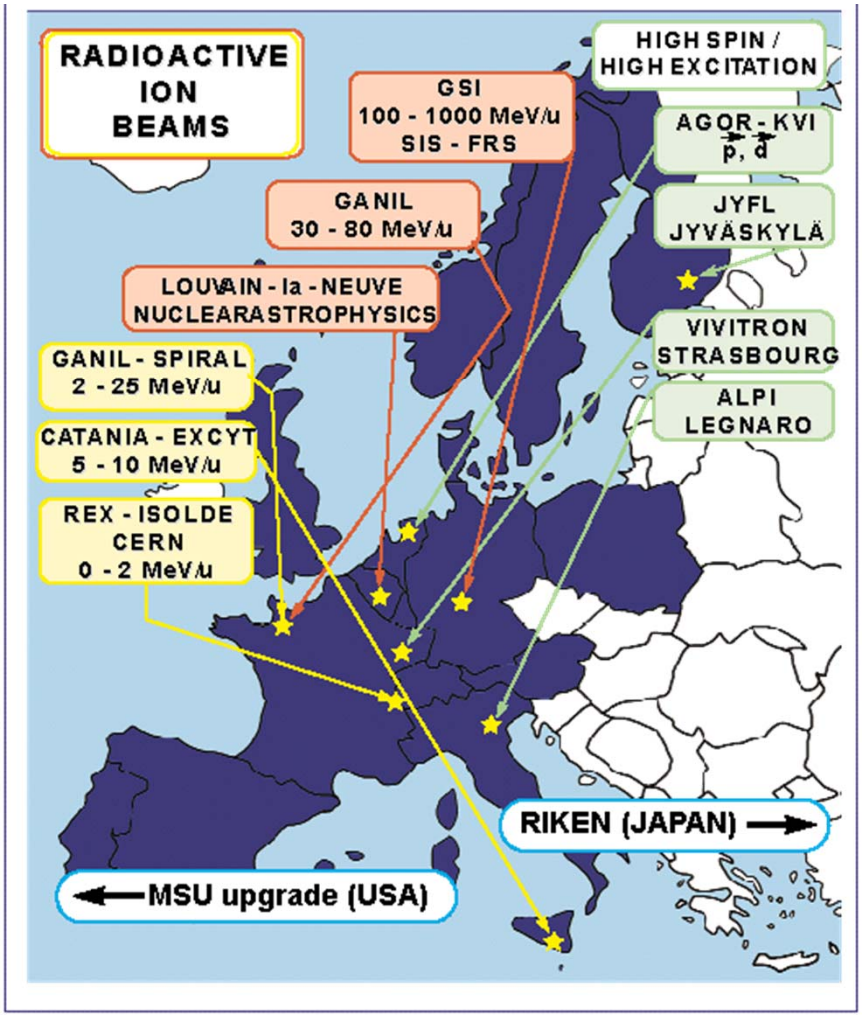
Estructura y dinámica nuclear

Aceleradores



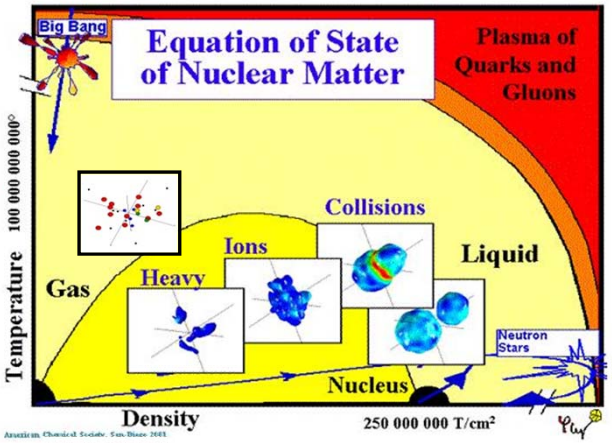
Estructura y dinámica nuclear

Aceleradores en Europa

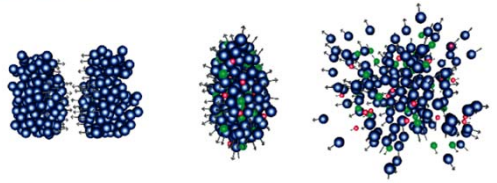


Fases de la materia nuclear

Ecuación de estado de la materia nuclear
Simetría chiral y masa hadrónica
Verificación de QCD: transición de fase del plasma de quarks y glones



- materia nuclear caliente
  - ✓ multifragmentación
  - ✓ transición de fase entre la materia nuclear y la materia h
- materia hadrónica densa y caliente
  - ✓ compresión-expansión: fenómenos colectivos (flow)
  - ✓ producción de partículas por debajo del umbral
  - ✓ propiedades de hadrones en el medio nuclear



- plasma de quarks y gluones
  - ✓ transición de fase entre la materia hadrónica y el plasma de quarks y gluones
- sondas experimentales
  - ✓ iones pesados relativistas y ultrarrelativistas

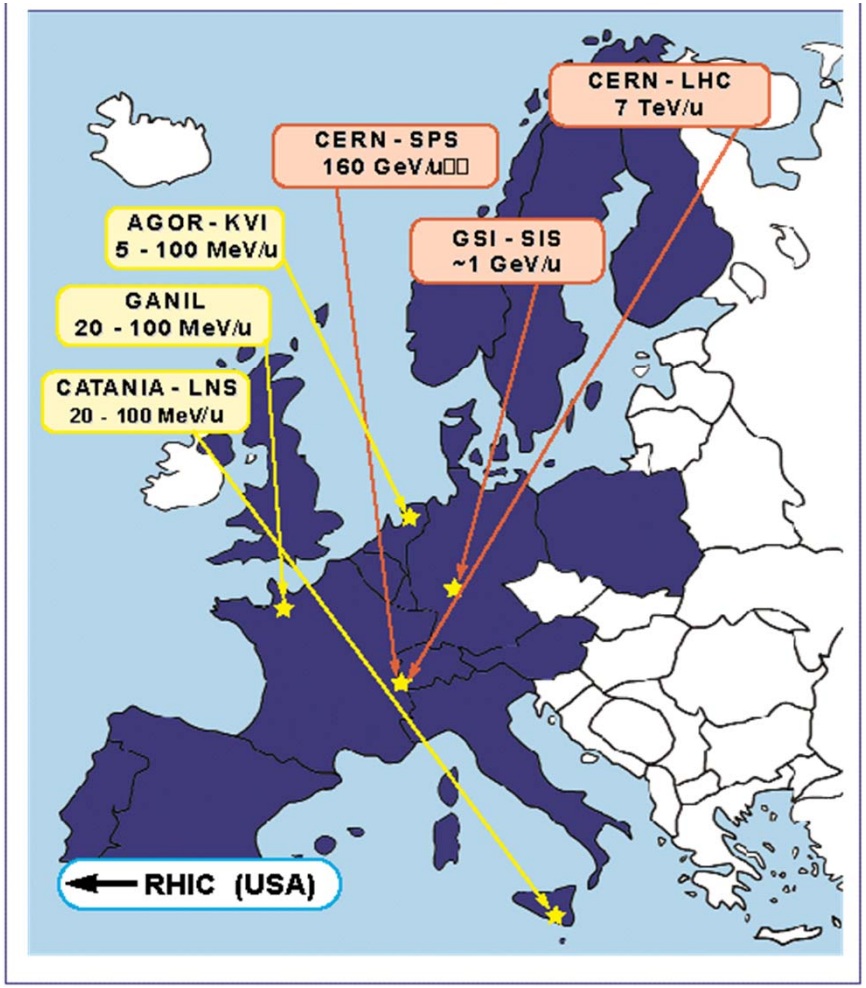
Fases de la materia nuclear

Instalaciones experimentales

- multifragmentación:
  INDRA(GANIL), Chimera(Catania), Aladin(GSI)

- hadrones en el medio nuclear:
  KAOS, Fopi, Hades(GSI), Ceres(CERN)

- plasma de quarks y gluones:
  Star, Phenix(RHIC), Alice(CERN)

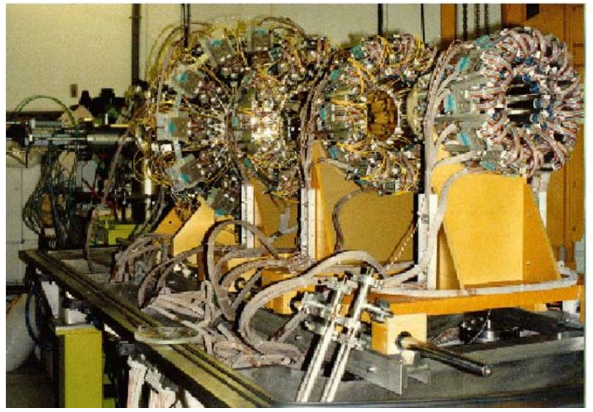


Fases de la materia nuclear

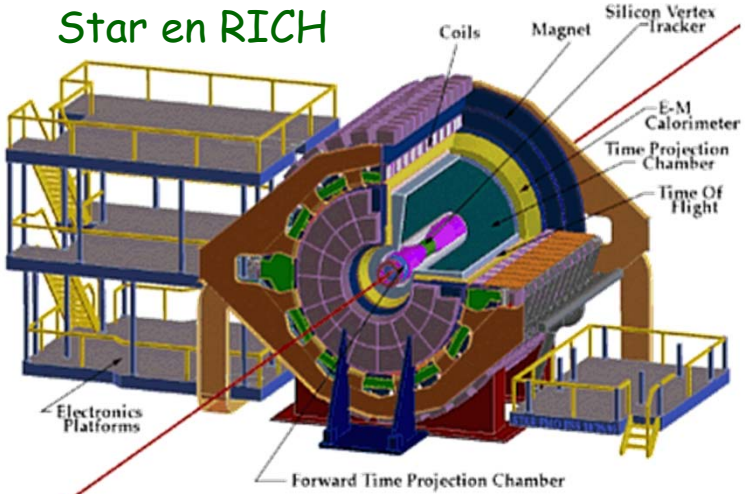
Dispositivos experimentales

- multifragmentación:
  INDRA(GANIL), Chimera(Catania), Aladin(GSI)
- hadrones en el medio nuclear:
  KAOS, Fopi, Hades(GSI), Ceres(CERN)
- plasma de quarks y gluones:
  Star, Phenix(RHIC), Alice(CERN)

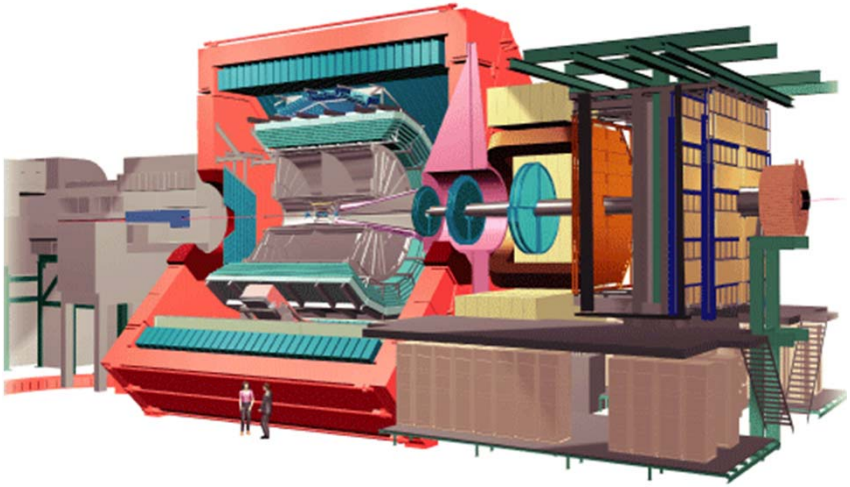
Indra en GANIL



Star en RICH



Alice en el CERN

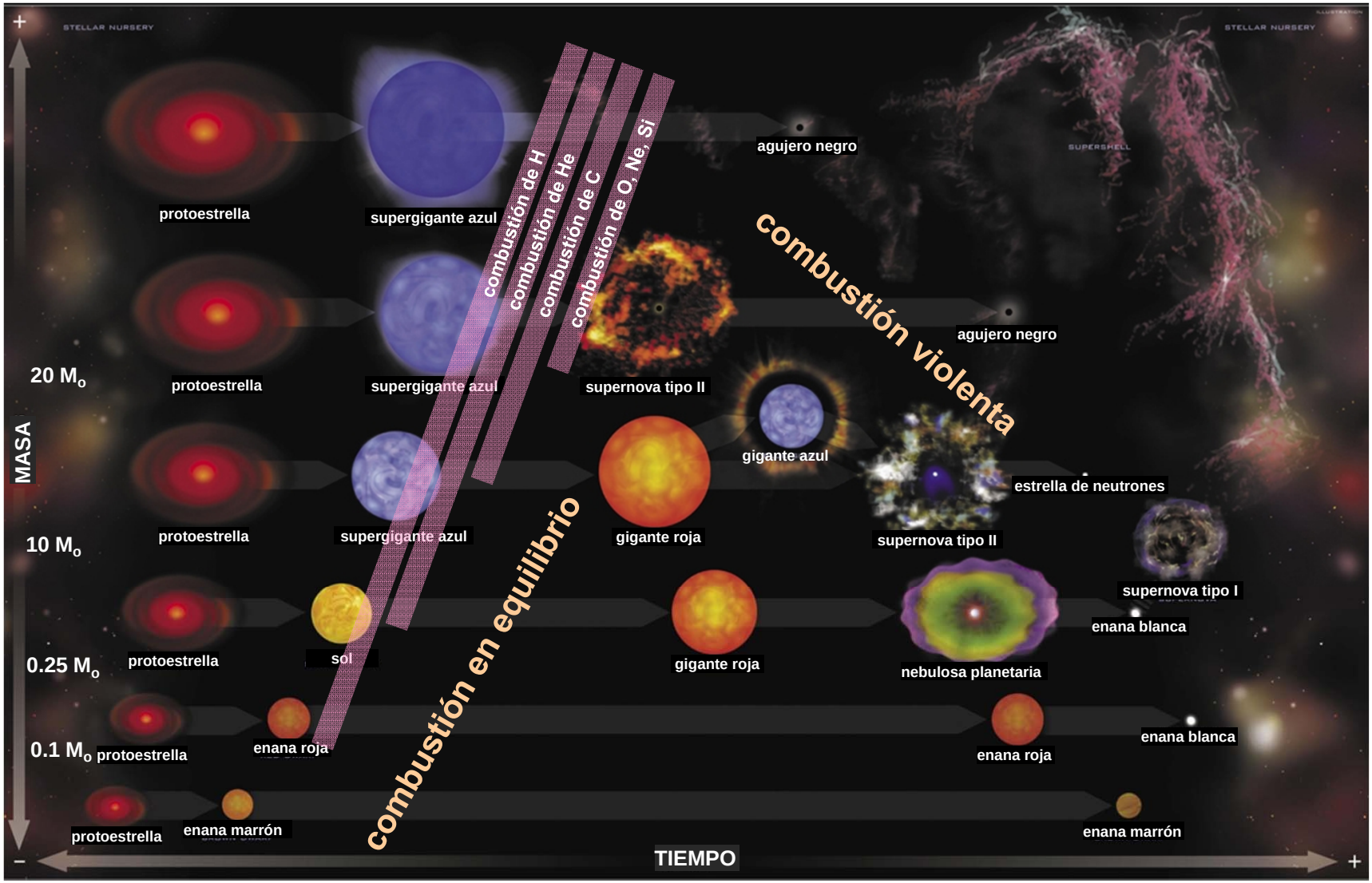


Astrofísica nuclear

Producción de masa y energía en el Universo
Reacciones termonucleares que rigen la evolución de los cuerpos estelares

- nucleosíntesis de Big-Bang
- nucleosíntesis estelar
  - ✓ producción de elementos ligeros: ciclos p-p, CON, fusión
  - ✓ producción de elementos pesados: proceso rp, proceso s, proceso r
- materia nuclear densa y caliente: EOS
  - ✓ explosiones tipo supernovae, estrellas de neutrones, ...
- producción de neutrinos y rayos cósmicos
- cosmocronología
- técnica experimentales
  - ✓ neutrones, gammas, núcleos exóticos, iones pesados relativistas

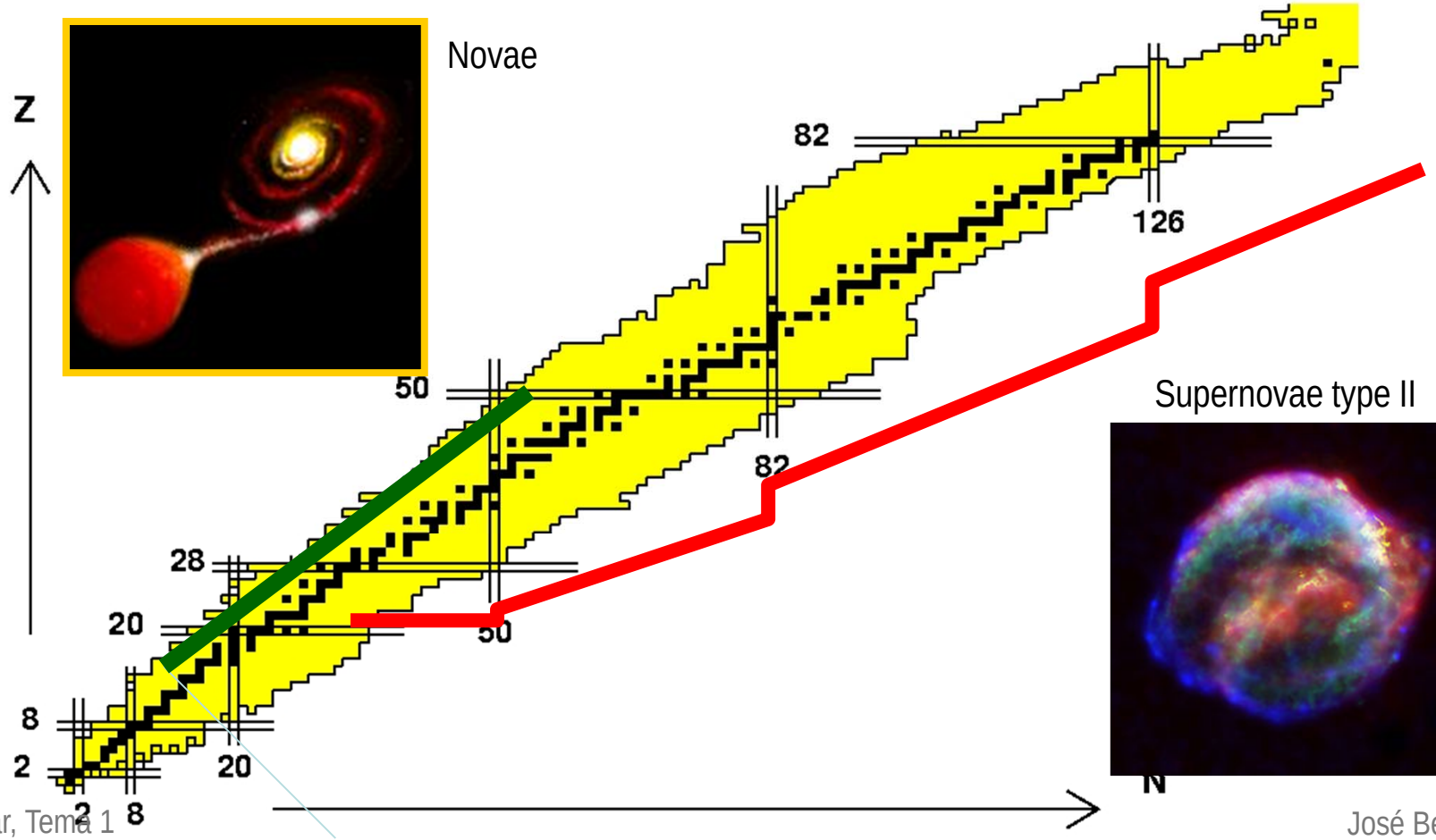
El origen de los elementos en el cosmos



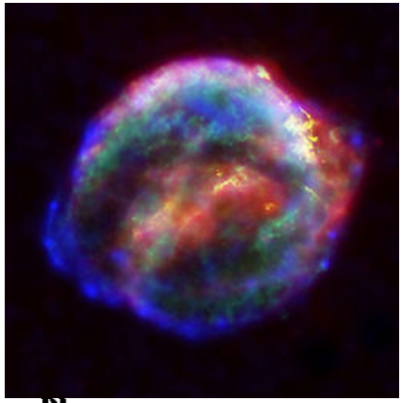
Procesos de nucleosíntesis estelar

Los elementos químicos más pesados se cree que se producen en estrellas que evolucionan de forma violenta. La mayor parte de los núcleos que se producen en esas estrellas no son estables y los físicos todavía no hemos sido capaces de sintetizarlos en los laboratorios.

Novae



Supernovae type II

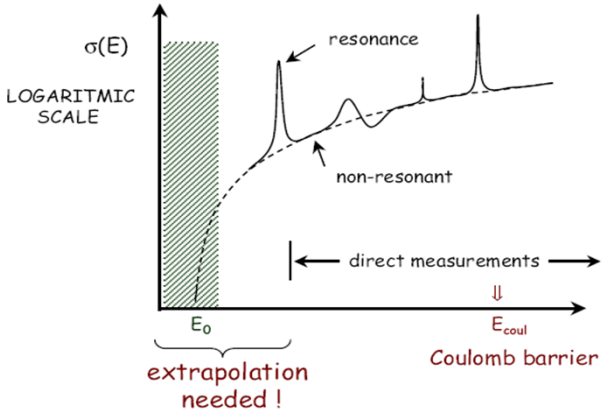


Astrofísica nuclear: estudio experimental

✓ Reacciones inducidas por p y α a baja energía: el experimento LUNA (Gran Sasso)

Laboratorio subterraneo:

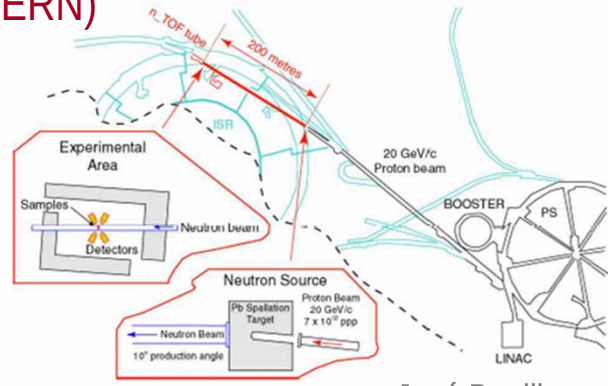
- secciones eficaces muy pequeñas de interés astrofísico
- medidas de larga duración y bajo fondo



✓ Reacciones de captura de neutrones: el experimento N_TOF (CERN)

Fuente de neutrones de espalación con gran resolución en la determinación de la energía de los neutrones (ToF):

- reacciones de interés astrofísico (proceso s)
- reacciones de transmutación de residuos nucleares



Interacciones fundamentales y simetrías

En el núcleo atómico están presentes las tres interacciones fundamentales que constituyen el modelo estándar y por tanto ofrece la posibilidad de estudiar dichas interacciones y los límites del modelo standard

- test de QED
  - ✓ átomos muónicos anti-μ - e-
  - ✓ átomos pesdos altamente ionizados: $^{238}U^{91+}$
- test de simetrías
  - ✓ violación C, P y T en desintegraciones beta
- interacción débil: física más allá del modelo standard
  - ✓ determinación de constantes de acoplo
  - ✓ unitariedad de la matriz CKM
- técnica experimentales
  - ✓ desintegraciones beta en transiciones super-permitidas $0^+ \rightarrow 0^+$
  - ✓ medidad de precisión de correlaciones β-ν con trampas de iones

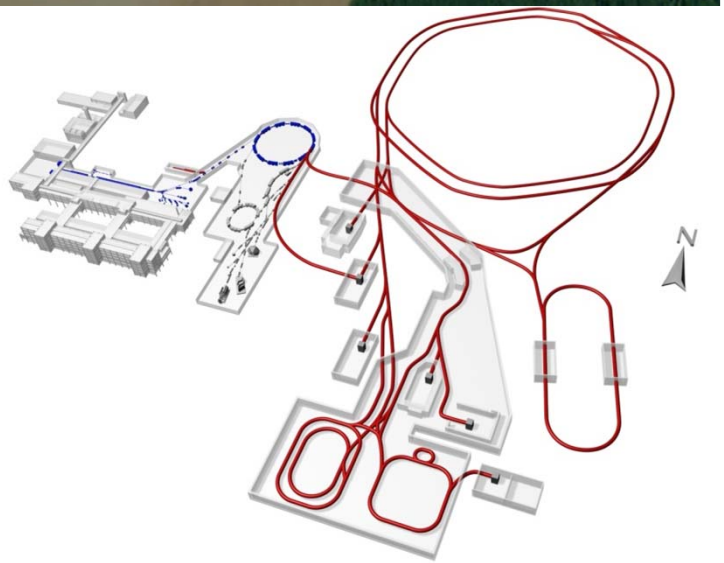
Aplicaciones de la Física Nuclear

- física médica
  - ✓ técnicas de diagnóstico (RMN, TAC, PET, …)
  - ✓ técnicas terapeuticas (radioterapia)
- producción de energía
  - ✓ fisión nuclear
  - ✓ fusión nuclear
- aplicaciones industriales, artísticas, geológicas, …
  - ✓ técnicas no destructivas de análisis de composición de muestras
  - ✓ técnicas de datación
- aplicaciones medioambientales
  - ✓ radiactividad ambiental
  - ✓ estudios de contaminación
  - ✓ seguimiento de corrientes marinas o subterráneas

El futuro de la Física Nuclear

FAIR: el mayor centro internacional de investigación en Física Nuclear

CN DE ES FI FR GB GR IN IT PL RO RU SE



El mayor centro internacional de investigación en física nuclear y hadrónica:

✓ haces de iones y antiprotones hasta 30 A GeV y luminosidades sin precedente
✓ 13 paises participantes
✓ 2500 científicos partipantes en propuestas experimentales
✓ coste base de la instalación 1280 M€

Programa científico:

✓ Estructura y dinámica nuclear con núcleos exóticos (NUSTAR)
✓ Estructura de hadrones y QCD no perturbativa con antiprotones
✓ Materia nuclear a alta densidad, colisiones entre iones pesados relativistas hasta 30 A GeV
✓ Física Atómica y Físca de Plasmas