

Cómo (no) funciona un Reactor Nuclear

Jürgen Engelfried

Instituto de Física
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
México

La Ciencia en el Bar
6 de Abril 2011
Facultad de Ciencias
3 de Mayo 2011

Facultad de Ciencias Químicas
17 de Mayo 2011
Hospital IMSS Zapata
26 de Mayo 2011

Introducción

Noticias en los últimos días

- Se reporta una radiación de 1000 micro-Sievert arriba de la planta nuclear de Fukushima
- Los niveles del Yodo-131 en el mar cerca de la planta son 4000 veces el nivel permitido
- En el Municipio de Xilitla hay alerta: Si llueve no se debe salir de la casa por posibles efectos de la radioactividad proveniente de Japón

El Pulso de San Luis
Sábado, 2 Abril



Foto: J. Carlos González / Pulso

...dico Municipal
...diera una

...édico, María Eun-
...fante, reconoció
...ma se generó por
...sistema y aseguró
...trabaja de ma-
...y el lunes las per-
...o pudieron salir
...podrán hacer sin
...o el plazo de tiem-
...as hábiles.

...les anti
...encia,
...e obispo



PAC. 6

Injustificado, temor a nube radioactiva

En caso remoto
de que llegara algo
de polvo, basta
un baño: Engelfried

LUCÍA E. TORRES
San Luis Potosí/Pulso

En México no hay riesgo
de que llegue una nube
radioactiva del Japón, y en
caso de que se registre ese
hecho, la lluvia alejaría el
polvo y las personas pue-
den evitar daños con solo
bañarse, explicó el profe-
sor investigador del Insti-
tuto de Física de la UASLP
e investigador nacional ni-
vel III Jürgen Engelfried.



El impacto del
polvo radioactivo
es mínimo
y el efecto total
a la población
es menor que
tomar rayos X"

JÜRGEN ENGELFRIED
INVESTIGADOR DE FÍSICA, UASLP

...menos que cuando se to-
...man unos rayos X en las

Sólo por corrupción llegaría radiactividad a México

Los mexicanos deberían preocuparse más por un acto de corrupción que por el que la naturaleza arrastre las partículas a través del mar, señaló el investigador de la UASLP, Jürgen Engelfried.

Paulina Bárcenas
Plano Informativo
09/04/2011



Enviar por correo



Imprimir

OTRAS NOTAS RELEVANTES

- Autorizan ampliación de Peñasco
- Sólo por corrupción llegaría radiactividad a México
- Alumno de Tampacán participará en Olimpiada de Historia
- Realizarán paso a desnivel en Glorieta Juárez



Suscríbete

5 retweet

Share 32

Los mexicanos deben estar más preocupados de que se repita un suceso de corrupción que permita la llegada de alimentos con radiación al país, que por el hecho de que sea la propia naturaleza la que acarree estas partículas a través del aire o el mar.

The New York Times Reprints

This copy is for your personal, noncommercial use only. You can order presentation-ready copies for distribution to your colleagues, clients or customers [here](#) or use the "Reprints" tool that appears next to any article. Visit www.nytreprints.com for samples and additional information. [Order a reprint of this article now.](#)



May 2, 2011

Drumbeat of Nuclear Fallout Fear Doesn't Resound With Experts

By **WILLIAM J. BROAD**

Correction Appended

The nuclear disaster in Japan has sent waves of radiation and dread around the globe, prompting so many people to buy radiation detectors and potassium iodide to fend off [thyroid cancer](#) that supplies quickly sold out.

The fear is unwarranted, experts say. People in Japan near the Fukushima Daiichi nuclear power plant may have reason to worry about the consequences of radiation leaks, [scientists say](#), and some reactor workers, in particular, may suffer illness. But outside of

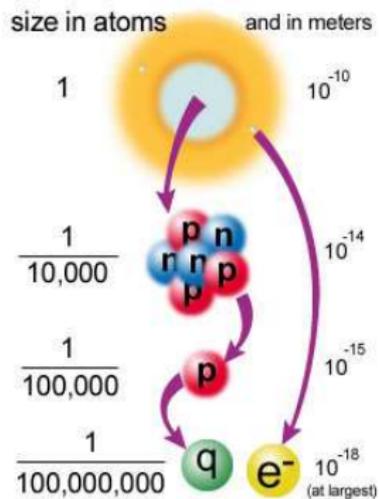
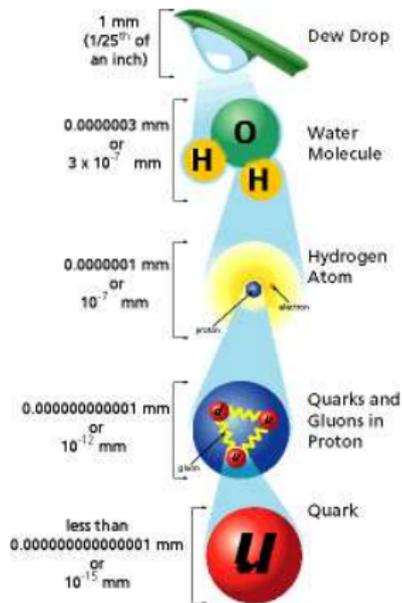
Motivo de la charla:

- Explicar algunas bases de reacciones y reactores nucleares
- Que ustedes puedan valorar y evaluar que realmente es radiación y radioactividad

Contenido

- 1 Física Nuclear
- 2 Diseños de Reactores
- 3 Medir Radiación
- 4 Accidentes
- 5 Resumen

Átomos, núcleos, ...



- El núcleo es muy pequeño: El tamaño es 1/10000 de un átomo
- El núcleo es compuesto de protones y de neutrones
- tamaño de un protón/neutrón: 10^{-15} m
(0,000000000000001 m)
- Cualquier sistema ligado es más ligero que la suma de las masas de sus componentes – también un núcleo
- Diferencia: Energía de Amarre: $E = mc^2$
Energía y masa es lo mismo.

Masas Nucleares

Algunos ejemplos de masas nucleares:

- Hidrógeno: 1 protón: ${}^1_1\text{H}$

$$m_{\text{H}} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 938,3 \text{ MeV}/c^2$$

- Helio: 2 protones, 2 neutrones: ${}^4_2\text{He}$

($\frac{A}{Z}\text{X}$)

$$2m_p = 1876,6 \text{ MeV}/c^2$$

$$2m_n = 1879,2 \text{ MeV}/c^2$$

$$2m_p + 2m_n = 3755,8 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_{\text{He}} = 3727,4 \text{ MeV}/c^2$$

$$E_B = 28,4 \text{ MeV}/c^2 \quad (0,75 \%)$$

Masas Nucleares (cont)

- Uranio-235: 92 protones, 143 neutrones: ${}_{92}^{235}\text{U}$

$$92m_p + 143m_n = 220682,1 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_{235\text{U}} = 218896,8 \text{ MeV}/c^2$$

$$E_B = 1785,3 \text{ MeV}/c^2 \quad (0,8\%)$$

- Las masas (y la energía de amarre E_B) se ha medido por más que 3000 núcleos.

Fórmula de von Weizsäcker (1935)

Modelo de la gota: $R = 1,2 \text{ fm } A^{1/3}$

$$M(A, Z) = Nm_n + Zm_p - a_V A + a_S A^{2/3} + a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_a \frac{(N - Z)^2}{4A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

$$Z + N = A$$

$$a_V = 15,67 \text{ MeV}/c^2 \quad a_S = 17,23 \text{ MeV}/c^2$$

$$a_C = 0,714 \text{ MeV}/c^2 \quad a_a = 93,15 \text{ MeV}/c^2$$

$$\delta = \begin{cases} -11,2 \text{ MeV}/c^2 & Z \text{ par y } N \text{ par} \\ 0 \text{ MeV}/c^2 & A \text{ impar} \\ +11,2 \text{ MeV}/c^2 & Z \text{ impar y } N \text{ impar} \end{cases}$$

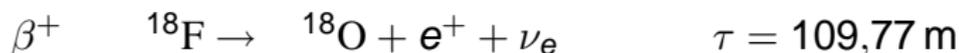
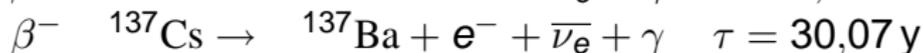
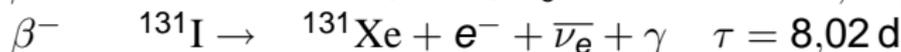
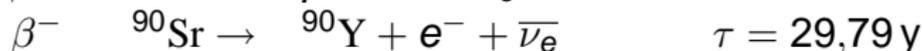
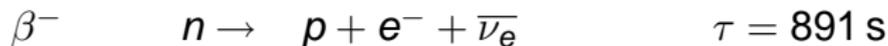
Decaimientos Radioactivos

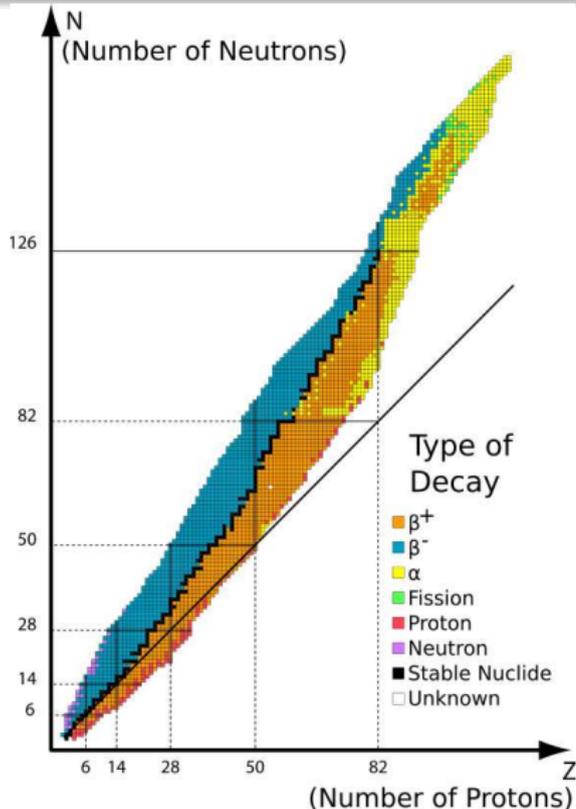
Si hay “núcleo vecinos” que cumplen con alguna de las condiciones el núcleo es in-estable y decae espontáneamente:

- Decaimiento α : $M(A, Z) > M(A - 4, Z - 2) + m_{\text{He}^4}$
- Decaimiento β^- : $M(A, Z) > M(A, Z + 1) + m_e$
- Decaimiento β^+ : $M(A, Z) > M(A, Z - 1) + 2m_e$
- Decaimiento γ : Desexcitación de un núcleo excitado

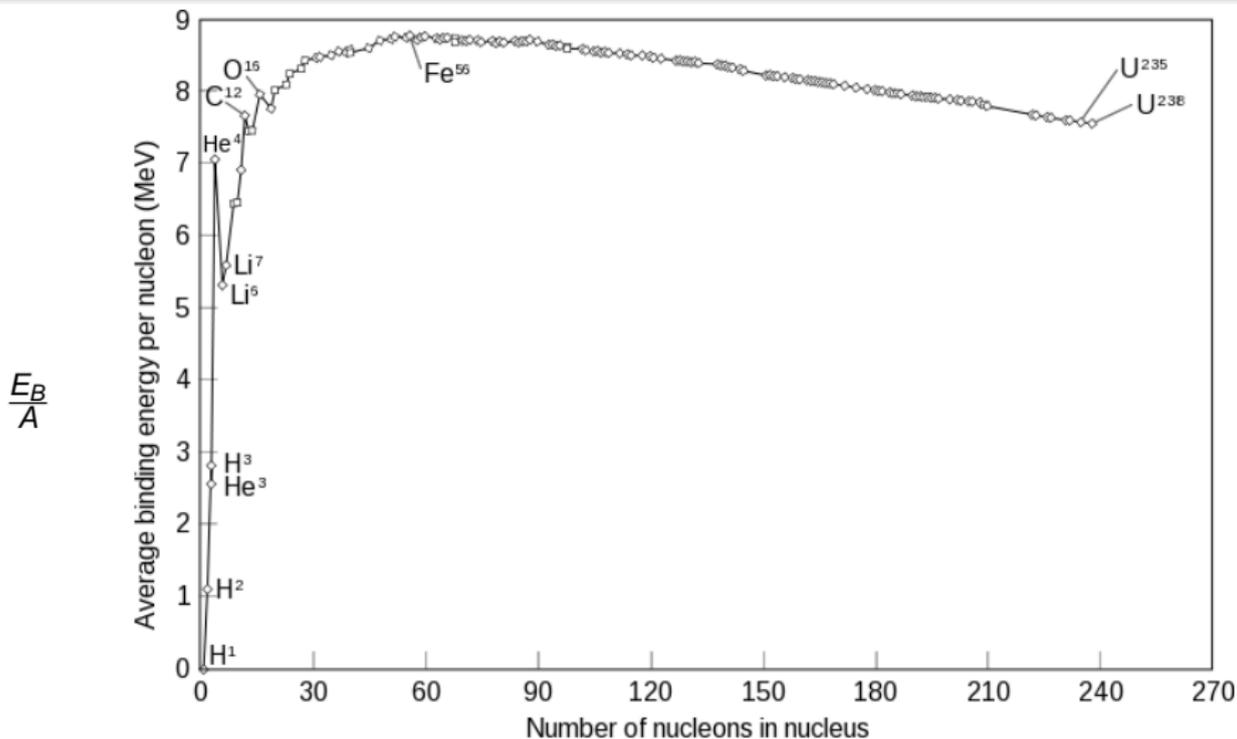
- Fusión: 2 núcleos ligeros a un pesado
- Fisión: rompimiento de un núcleo grande

Ejemplos de Decaimientos Radioactivos

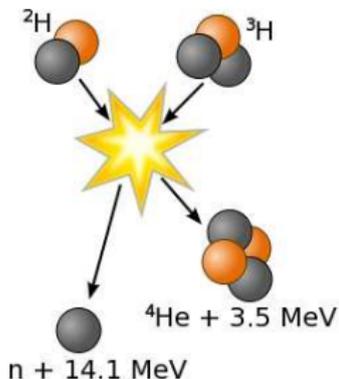




- Solo algunas combinaciones de (Z, N) son estables
- De más grande es Z , de más neutrones tiene un núcleo estable



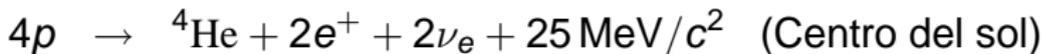
Fusión



Juntar dos núcleos.
Mientras el resultado es $< \text{Fe}$:
se gana energía.

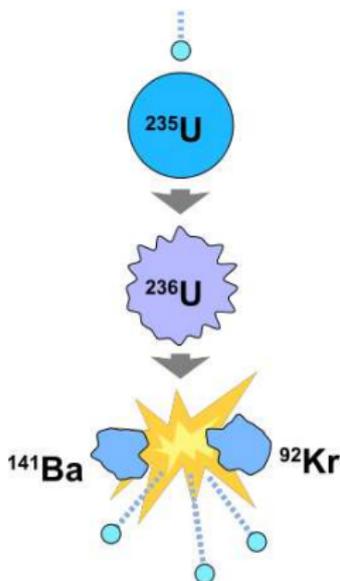
Requiere Energía cinética (temperatura) alta
para compensar la repulsión de Coulomb

Ejemplos:



Hasta hoy: No hay fusión controlada en un reactor.

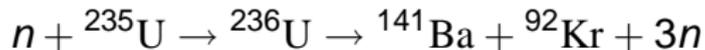
Fisión



Rompimiento de un núcleo.

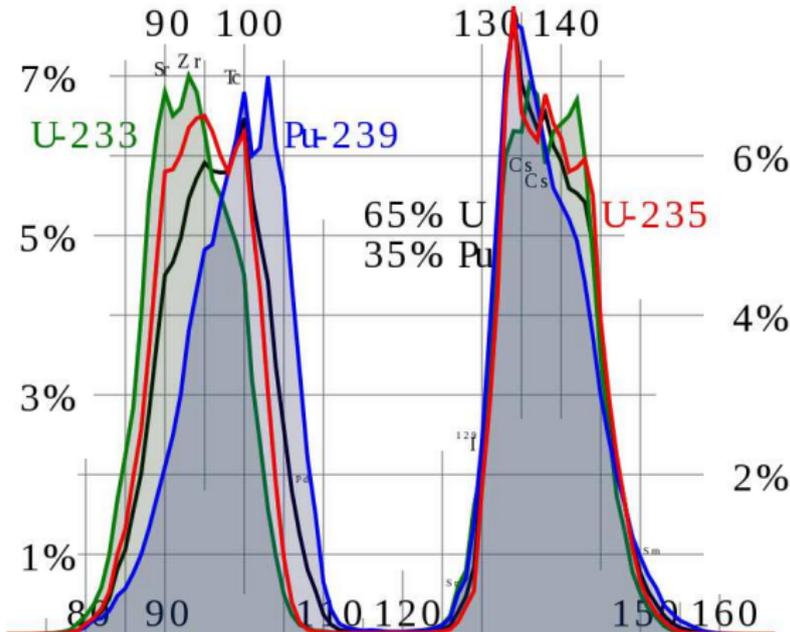
Pasa espontáneamente y por excitación

Ejemplo:



Otros divisiones también posibles.

Productos de Fisión



En promedio:

$\sim 200 \text{ MeV}/c^2$

^{235}U : 2.4 neutrones

^{239}Pu : 2.9 neutrones

Reacción de Cadena

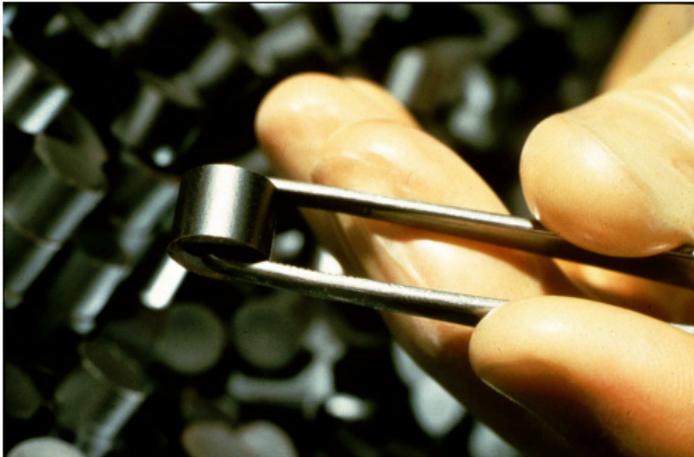
- Inicio: un ^{235}U absorbe un neutrón (térmico)
- El ^{236}U se rompe en dos, y emite 2.4 neutrones (con $\sim 2 \text{ MeV}/c^2$ Energía cinética)
- Los neutrones se termalizan (ver más tarde)
- Cada neutrón puede iniciar otra reacción.
- Si no se controla el número de neutrones: **Explosión.**

⇒ vídeo

Disney, 1957: "Our friend the atom"

Como controlar el número de neutrones?

- Por geometría: Si hay “poco” material, algunos neutrones salen sin encontrar otro ^{235}U
 - \Rightarrow “Masa Crítica”: Depende de la geometría
 - Esfera pura de ^{235}U : 52 kg
 - Esfera pura de ^{239}Pu : 10 kg
- Por materiales que absorben neutrones: Boro, Grafito
- En Reactor: Uso de Uranio enriquecido de 2-8 %
(natural: 0.7 % ^{235}U)
- También: $n + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} + e^- + \bar{\nu}_e$
 $^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu} + e^- + \bar{\nu}_e$
- Agua alrededor de los elementos termaliza los neutrones y se calienta.

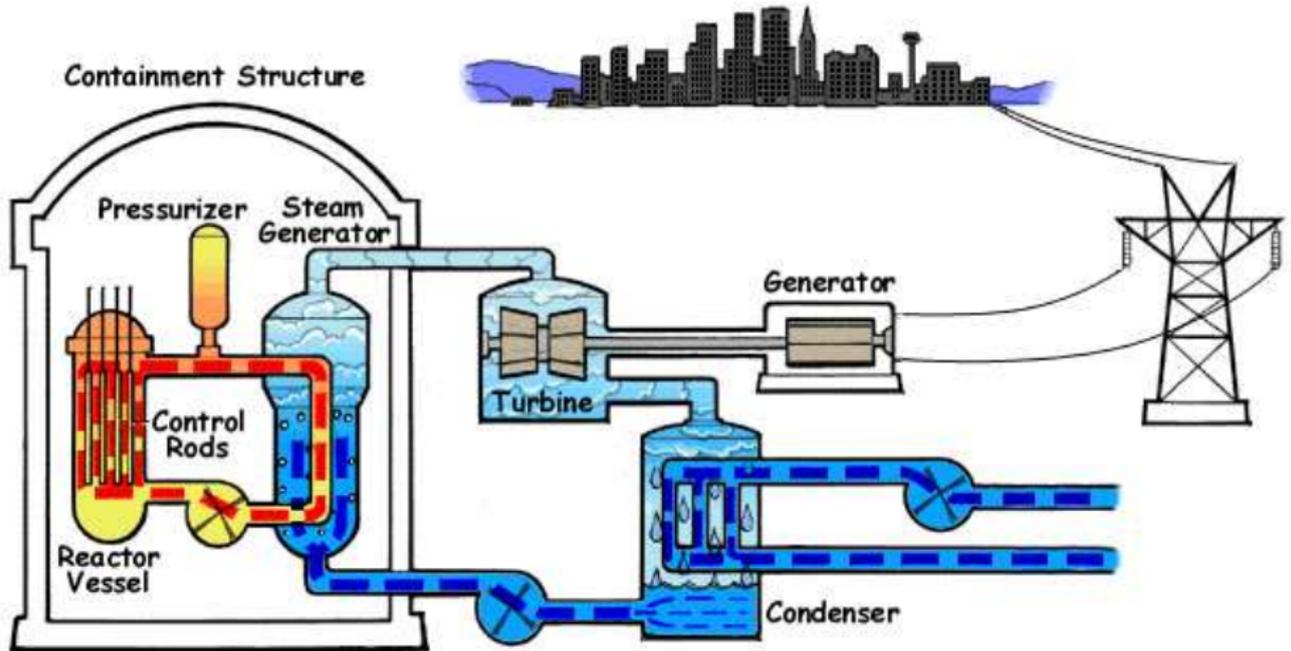


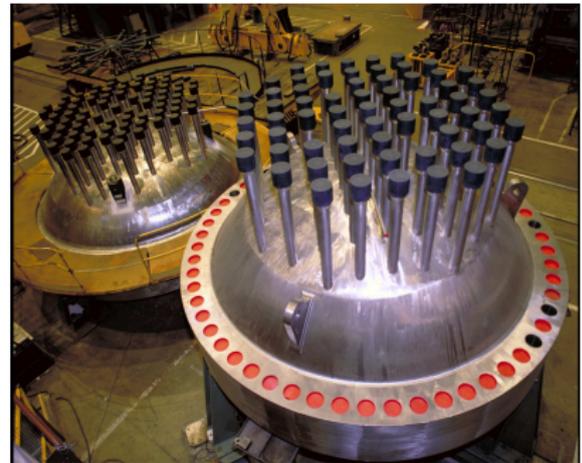
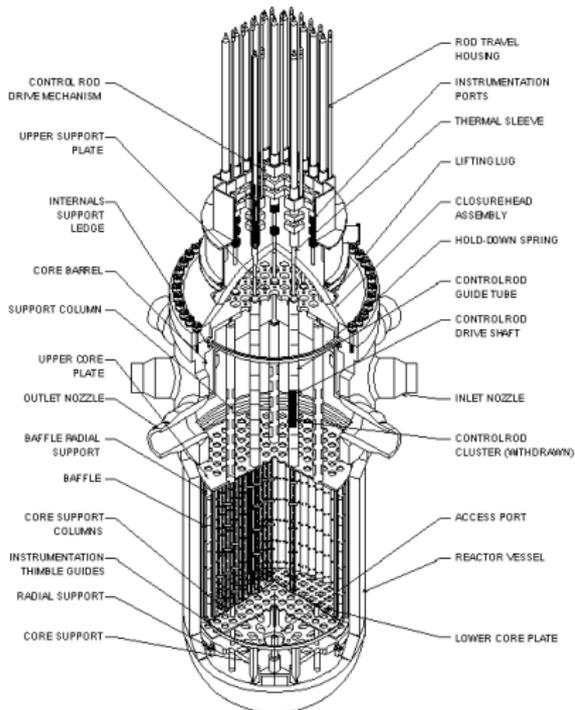
Pelleta



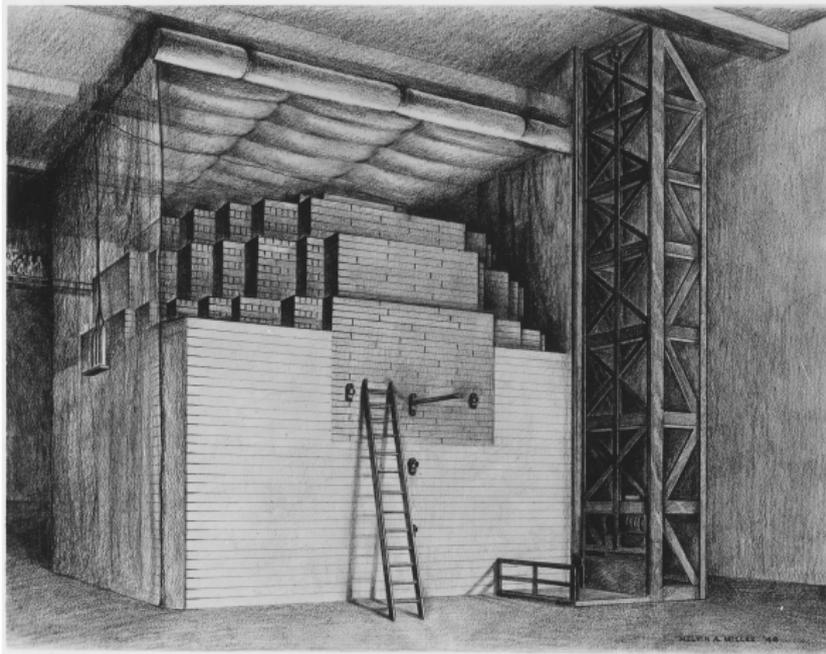
Arreglo de pelletas en
tubos

Reactor de Agua a presión (PWR)





Primer Reactor



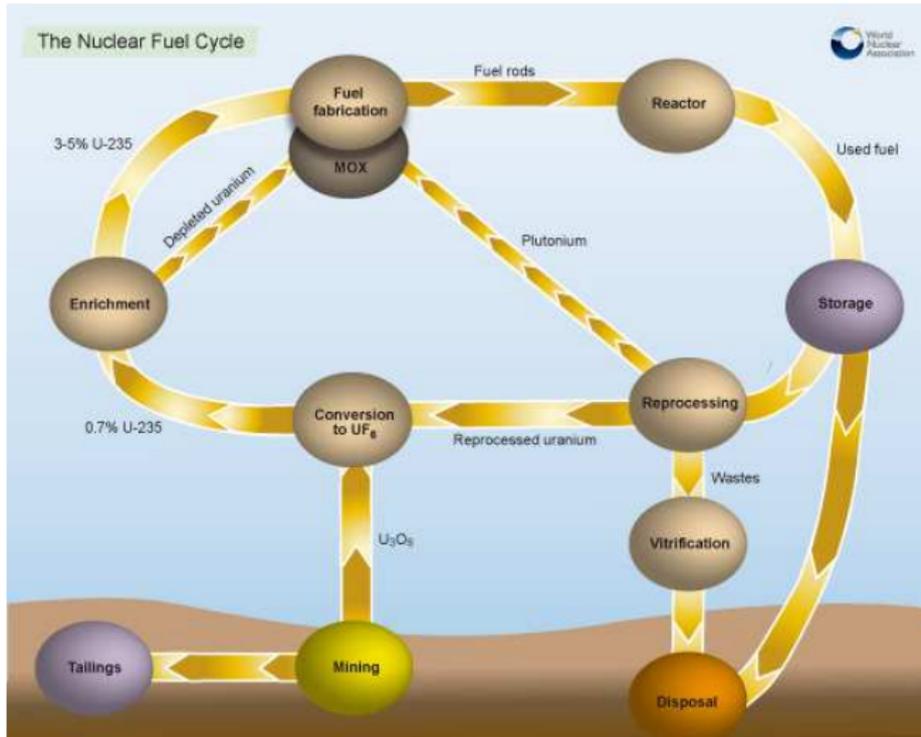
Chicago Pile 1, 1942. Primer reacción de cadena.

Primer Primer Reactor



- Descubierta 1972 en Oklo, Gabon, África
- Yacimiento de Uranio (con 3 % de ^{235}U , hoy 0.7 %).
- Hace 2mil millones de años se filtro agua, actuó como moderador
- Evaporó – paró la reacción – se enfrió – entró agua ...
- Funcionó por algunos cientos de miles de años con ciclos de 0.5h prendido y 2.5h apagado
- Se encuentran los isótopos de una reacción nuclear de cadena
- Usada para determinar que $\alpha = 1/137$ es constante

Ciclo de combustible nuclear (1)



Ciclo de combustible nuclear (2)

- Tiene varios puntos de peligro: accidentes, robo de plutonio
- El combustible se cambia cada 12-24 meses
- Combustible usado: Normalmente se guarda dentro de la planta en una “alberca” por varios años
- Alberca: Se puede ver Luz Cherenkov de los electrones del decaimiento β .
- La alberca requiere también enfriamiento

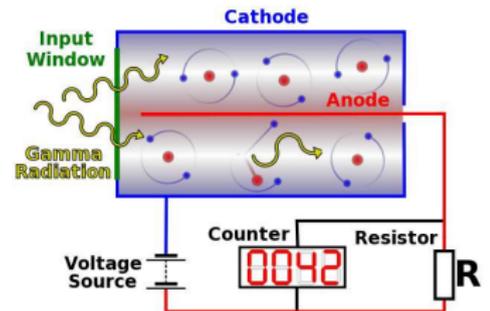
Tipos de reactores

- Más frecuente: Pressurized Water Reactor (PWR) (Three Mile Island)
- Boiling Water Reactor (BWR) (Fukushima, Laguna Verde)
- High-Power Channel Reactor (RBMK) (Chernobyl)

Tipo de reactor	Países	#	GWe	Combu	Enfriar	Moderador
Pressurised Water Reactor (PWR)	US Fr Jp Ru Ch	265	251.6	enr UO ₂	agua	agua
Boiling Water Reactor (BWR)	US Jp Sw	94	86.4	enr UO ₂	aqua	aqua
Pressurised Heavy Water Reactor	Can	44	24.3	nat UO ₂	HDO	HDO
Gas-cooled Reactor	UK	18	10.8	nat U enr UO ₂	CO ₂	grafito
Light Water Graphite Reactor (RBMK)	Ru	12	12.3	enr UO ₂	agua	grafito
Fast Neutron Reactor (FBR)	Jp Ru	2	1.0	PuO ₂ UO ₂	Na liq	none
Other	Ru	4	0.05	enr UO ₂	agua	grafito
TOTAL		439	386.5			

Detectores

- Descubrimiento de radioactividad: Bequerel (1896) con placas fotográficas
- Geiger, Marshden (PostDocs de Rutherford) (\sim 1908): detección de α 's con fósforos y ojo
- Geiger 1910, Geiger–Müller 1928:
- Muy eficientes, miden actividades muy bajas
- Existen detectores más sofisticados



Unidades de Medir Radiación

- Decaimientos/segundo: 1 Bequerel (Bq)
- 1 rad: dosis absorbida: 0.01 Joule en 1 kg de materia.
Original: Energía para destruir una célula
- 1 rem: Roentgen equivalent man: dosis absorbida multiplicado por un factor de peso (entre 1 y 10) para tomar en cuenta la efectividad biológica de radiaciones diferentes (α , β , γ , n)
- Unidad SI: 1 Sievert = 100 rem
- 1 mrem = $10 \mu\text{Sv}$

Radiaciones naturales (y no tan naturales)

- En la playa: 150 mrem por año (más el sol \Rightarrow cancer de piel)
- Todos fuentes naturales: promedio \sim 350 mrem/año
Guarapari, Brazil: 17 rem/año
- Vuelo sobre el Atlántico: 1-10 mrem
- Rayos X: Tórax: 6 mrem; Dental: 9 mrem
- Mamografía: 70 mrem
- Límite para trabajador nuclear: 5 rem/año
- Dosis instantánea sin efectos inmediatos: \lesssim 50 rem
- Dosis instantánea mortal (dentro de semanas)
en cuerpo entero: 500 – 1000 rem
- Accidente Three Mile Island $<$ 50 mrem en peor caso
- Chernobyl en Alemania: $<$ 25 mrem
- Trabajadores en Chernobyl: hasta 20000 rem/hora

Historia de Accidentes

Solo 3 accidentes “grandes” en reactores, más unos en plantas de procesamiento y centros de investigación

- 1979: Three Mile Island (Harrisburg, Pensilvania)
- 1986: Chernobyl (Ucrania)
- 2011: Fukushima (Japón)

Como apagar una planta nuclear?

- Apagar/prender tarda normalmente 1-2 semanas.
- Pero hay apagones de emergencia (en segundos!)
- Se introducen materiales que absorben neutrones (grafito, boro)
- Problema: continúan reacciones nucleares que producen calor, aprox 8 % del calor original, y producción de calor baja sobre varias semanas
- **Continuar enfriamiento es esencial!**

Falla de Enfriamiento

- Sobre-Calentamiento, evapora el agua
- Si hay contenedor: sube la presión. Si no: se va directa
- Se funden los elementos del combustible (a lo menos parcialmente)
- Se produce H_2 por disociación del agua:
Explosión Química
- Incendios: Evaporación del material
- Los metales fundidos se coleccionan en el fondo
- Pueden romper el contenedor y pasar al sub-suelo:
“China Sindrom” (hay una película con este titulo!)

Que sale en un accidente?

Productos de Fisión

- Más peligrosos: ^{131}I , ^{139}Cs , ^{90}Sr
- Otros también pero:
 - tienen tiempo de vida muy largo o muy corto
 - no se acumulan en el cuerpo

Combustible

- Uranio, Plutonio
- No hay problema de radiación, pero son metales pesados y extremadamente tóxico (como plomo)

Gases

- Vapor de agua, H_2
- Productos de reacción como Helio, Tritio, Radón,

Efectos Biológicos

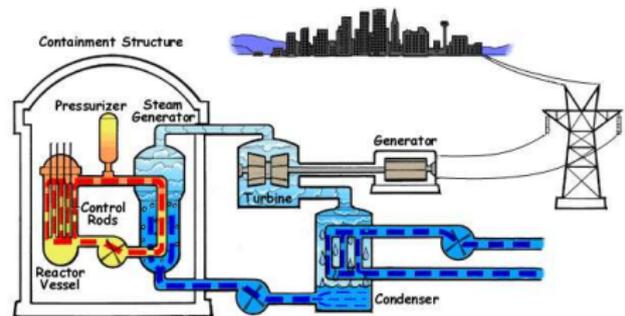
- ^{131}I Absorbido en la tiroides, $\tau = 8$ días. Prevención: Tabletas de Yodo para saturar la tiroides
- ^{90}Sr Químicamente similar a Ca, entra a los huesos.
 $\tau = 30$ años. Prevención: Ninguna
- ^{139}Cs Químicamente similar a K y Na, se absorbe en los músculos. $\tau = 30$ años, pero sale del cuerpo en ~ 2 años.
Prevención: Ninguna
- Toxicidad química de los metales pesados.

1979: Three Mile Island



1979: Three Mile Island

- Pressurized Water Reactor
- Inició con falla menor en circuito secundario de enfriamiento
- Apagón de emergencia
- Válvula de seguridad en el contenedor no funcionó
- Malfunción de instrumentos de presión y radiación.
- Se ventiló algo de gas con polvo radioactivo



1979: Three Mile Island (cont.)

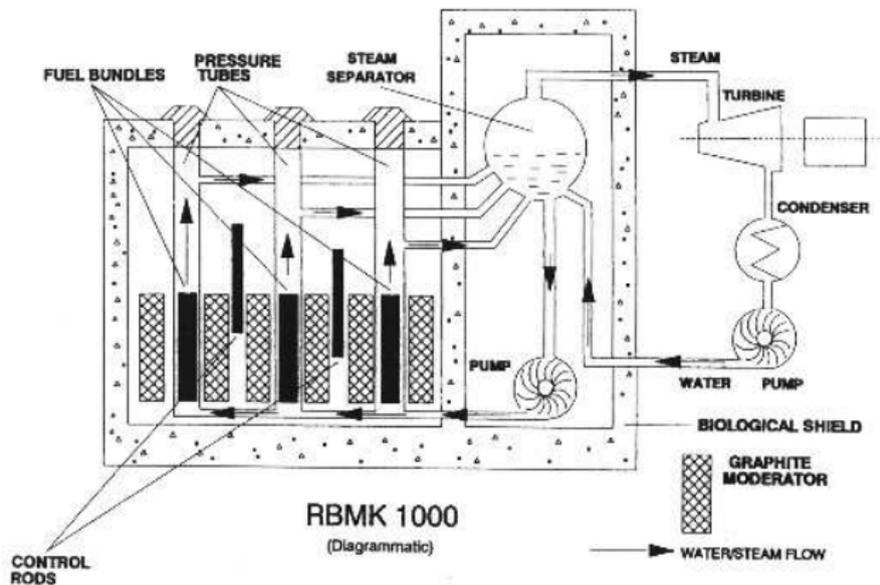
- Hubo mucha mal-información de los autoridades y de los medios
- Investigación final reveló que los operadores eran muy mal entrenados
- Efecto de radiación a la población cercana: 7 mrem (unos rayos X)



1986: Chernobyl



1986: Chernobyl



Abierto, sin contenedor (nave industrial)

1986: Chernobyl (cont.)

- diseño abierto, re-emplazo de los elementos de combustible continua (producción de plutonio)
- Moderador grafito, enfriamiento por agua: Inestable si se evapora agua (“positive void coefficient”): Tasa de Fisión incrementa
- Operadores no suficientemente entrenados
- Experimentaron para encontrar un conjunto de parámetros de operación más eficientes

1986: Chernobyl (cont.)

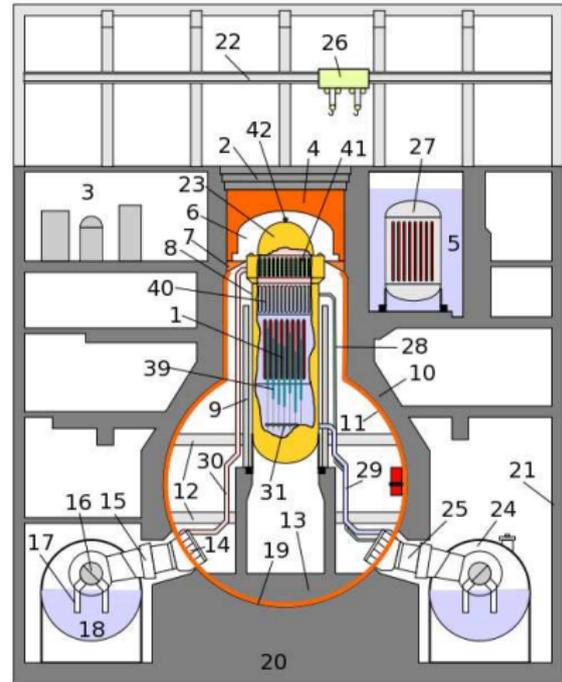
- Explosión de vapor, incendio
- aprox 5 % del combustible salió como nube de polvo radioactivo
- Nube de polvo se extendió hasta Europa de Norte (Suecia) y Alemania (sobre mí!)
- unos 60 muertos entre el personal de emergencia
- Después 25 años: Cerca de la planta hay “tasa elevada” de cáncer de tiroides, pero nada más
- Impacto más lejos: mínimo
- Impacto en México: Compró leche en polvo radioactiva.

2011: Fukushima



2011: Fukushima

- Es en flujo, aún no hay evaluación buena de lo que pasó ó que pasa realmente.
- BWR: Boiling Water Reactor
- Planta tiene 6 reactores
- 3 eran apagados, pero con combustible usado en las albercas
- Reactores construidos en los 60's.



2011: Fukushima: ¿Que pasó?

- Terremoto de 9.0 grados Richter. Parece sin daños en los reactores.
- Apagón de emergencia en todas las plantas nucleares.
- Se fue la luz – red de distribución eléctrica dañada por el terremoto
- Planta de generadores eléctricos (Diesel) prende y funciona bien
- Tsunami: Paredes alrededor de la planta no suficientemente altos
- Se inundó todo la planta
- Generadores y paneles eléctricas en los lugares más bajos
- Realmente se fue la luz!

2011: Fukushima

- **Diferente a otras accidentes: No hay infraestructura externa!**
- No hay bombas para el agua de enfriamiento
- Usaron equipo de bomberos para agua del mar
- Para bajar la presión abren válvulas: escapa gas
- Hay explosiones, parece por producción de H_2
- Originalmente se olvidaron de las albercas
- En el agua del mar se detecta radioactividad de la planta:
De donde escapa? Se dañó el contenedor?
- **Se detecta radioactividad en leche: Este aun no puede venir de este accidente!**

2011: Fukushima: Efectos

- Parece que salió mucho menos que en Chernobyl
- Impacto trabajadores de planta: algunos van a morir pronto.
- Impacto cerca (20 km) de la planta: Evacuación de la población, larga plazo: cancer (tiroides)
- Impacto en Japón: Monitoreo de comida (leche) por algunos años.
- Impacto fuera de Japón: mínimo.
- Impacto en México: Cero (mientras no compramos leche japonesa!)

Laguna Verde, Veracruz



- 2 reactores, mismo diseño y proveedor (General Electric) como Fukushima
- 10 años más joven.

Resumen

- La radioactividad es un fenómeno natural y tiene varias aplicaciones técnicas especialmente en la medicina
- La Fisión Nuclear se usa para la producción de electricidad (y bombas)
- En el funcionamiento “normal” la Energía Nuclear es relativamente limpia
- Hay riesgos de proliferación de plutonio para bombas nucleares
- Desechos nucleares deben ser tirados en lugares seguros por muchos miles de años
- Los accidentes son espantosos y ponen la población cerca de las plantas en riesgo
- El impacto del accidente más grande de la historia en Chernobyl con excepción de la vecindad de la planta es mínimo y comparable con unos rayos X
- Para México se espera un impacto nulo del accidente en Fukushima

Bibliografía

-  <http://world-nuclear.org/>
-  <http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm>
-  James William Rohlf: *Moder Physics from α to Z^0* . John Wiley & Sons, 1st edition 1994.
-  Bogdan Povh et al.: *Particles and Nuclei*. Springer, 4th edition 2004.