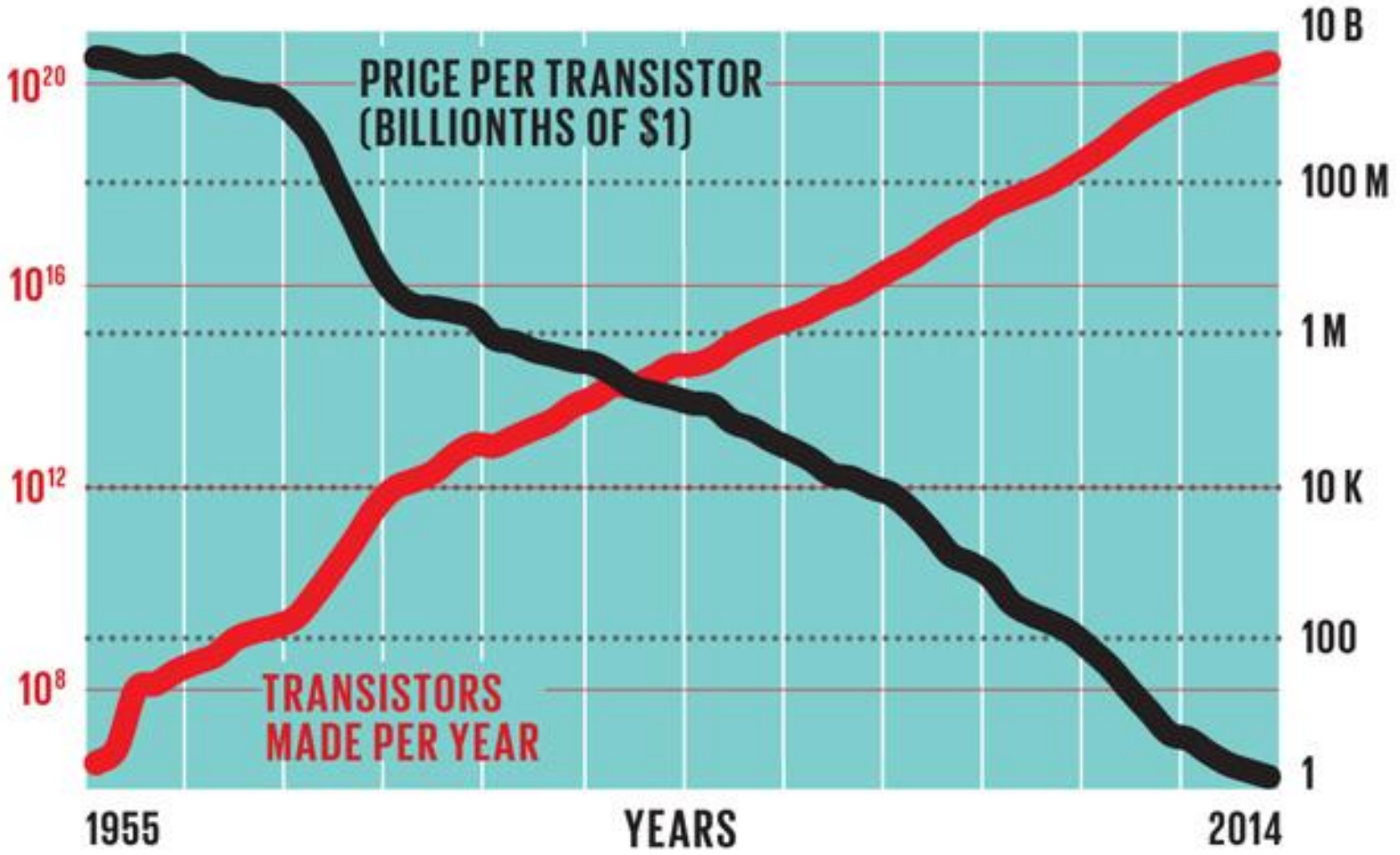
Ingeniería electrónica y el bosón de Higgs

Primer Seminario de Investigación DIE-UC
15 de marzo, 2019

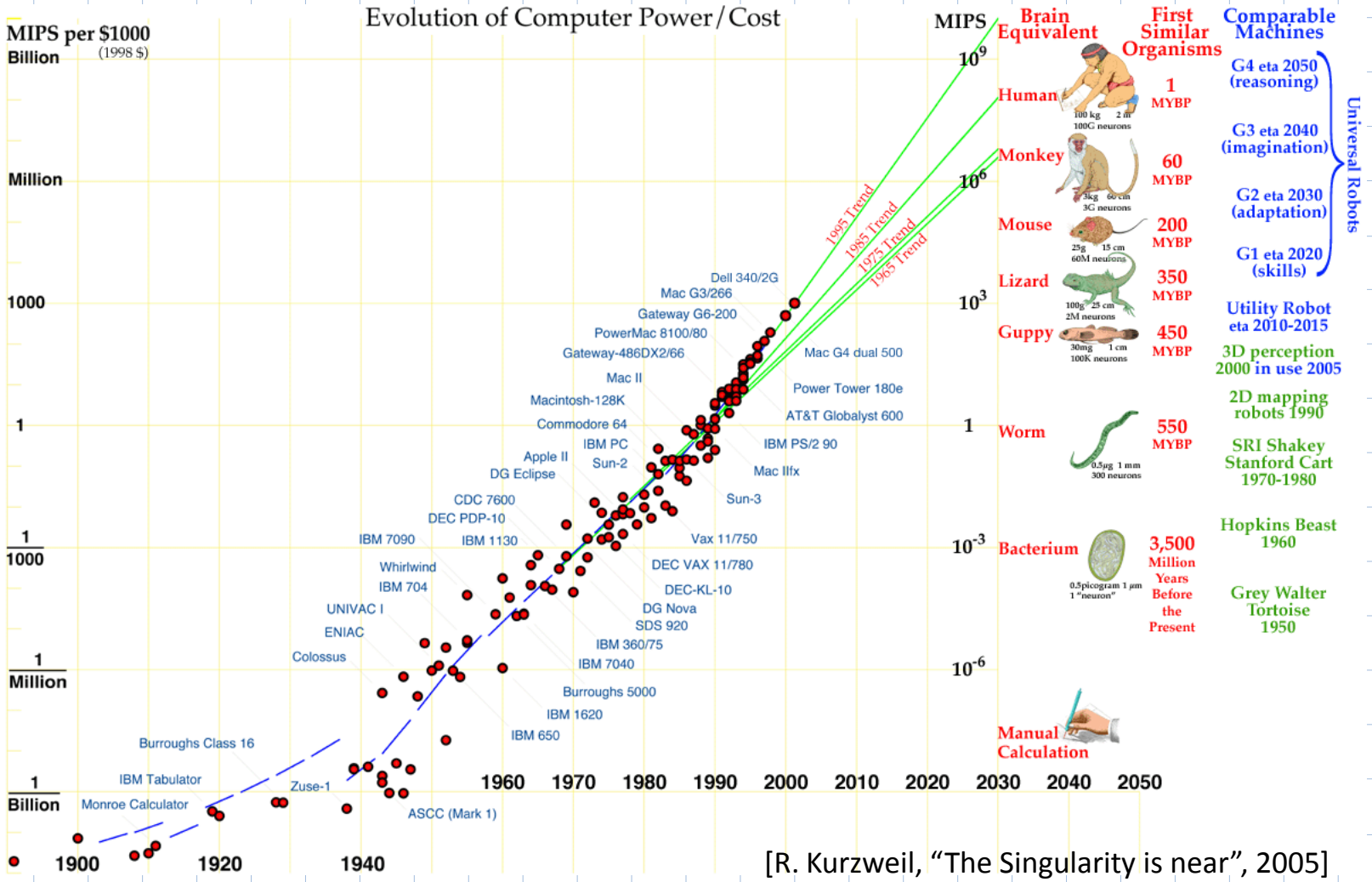
Angel Abusleme
angel@uc.cl

La revolución de la microelectrónica (1/3)
Ley de Moore



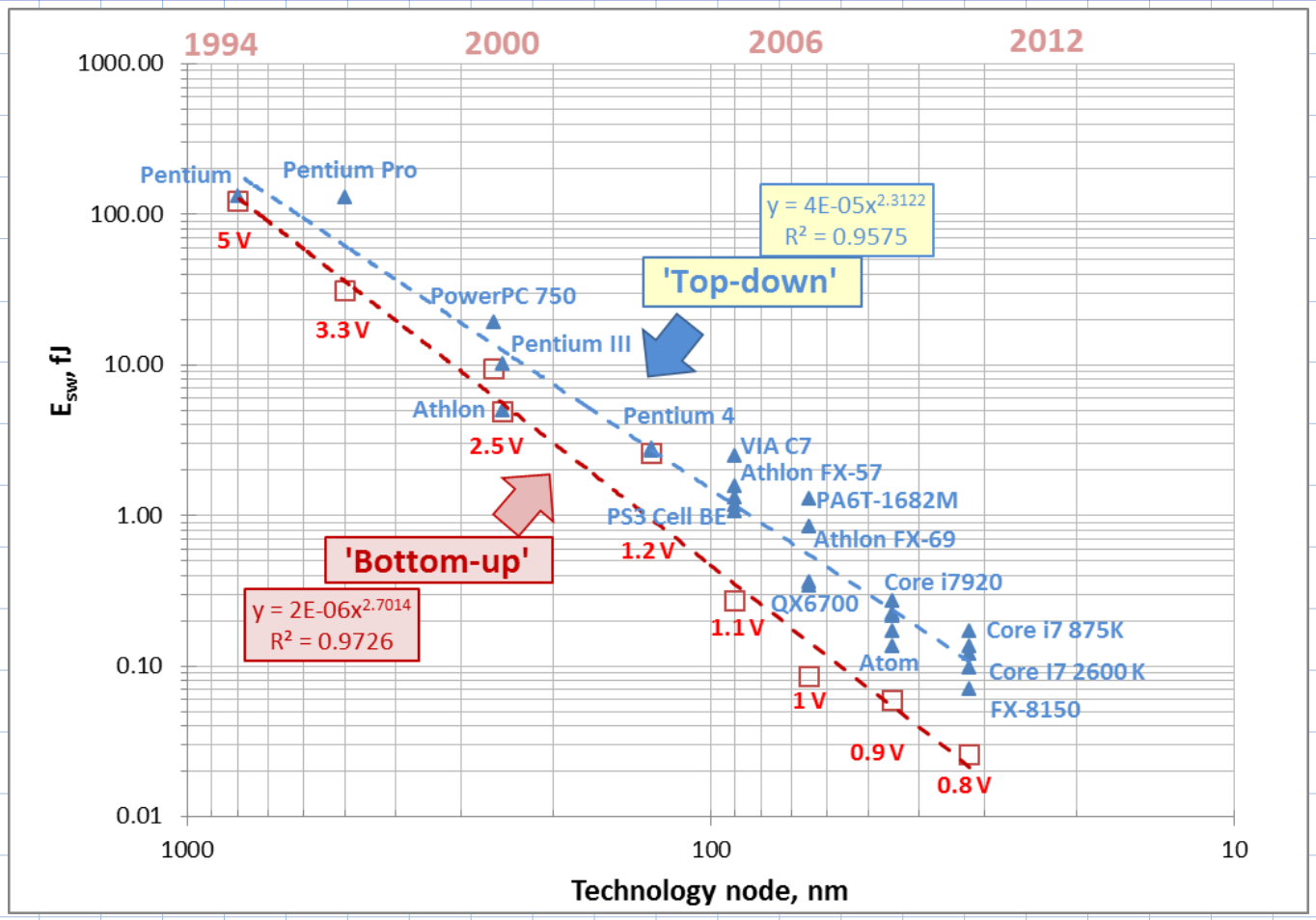
[D. Hutcheson, “Graphic: Transistor Production Has Reached Astronomical Scales”, IEEE Spectrum 2015]

La revolución de la microelectrónica (2/3)
Capacidad de procesamiento



[R. Kurzweil, "The Singularity is near", 2005]

La revolución de la microelectrónica (3/3)
Energía por operación



[V. Zhirnov, R. Cavin, L. Gammaitoni, "Chapter 7: Minimum Energy of Computing, Fundamental Considerations", "ICT - Energy - Concepts Towards Zero - Power Information and Communication Technology", 2014]

La electrónica en la vida cotidiana

TrackR

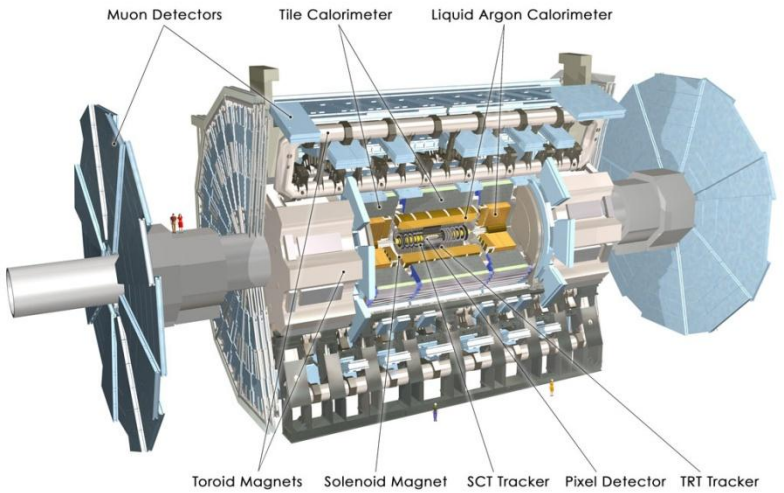
Mercedes-Benz F 015

MakerBot

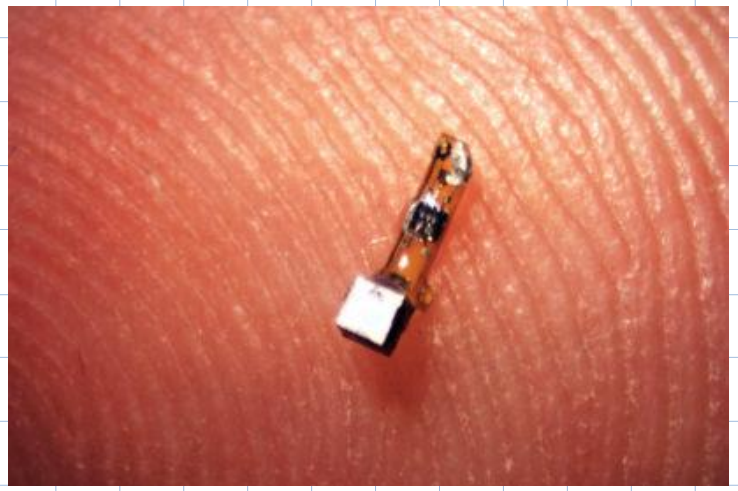
DJI Inspire

GoPro Hero 5

La electrónica en la investigación



Detector ATLAS, CERN



Neural dust, UC Berkeley

MicroBooNE detector, Fermilab

Fermi Gamma Ray Telescope

Microelectrónica en la UC

- Grupo de investigación IC-UC:

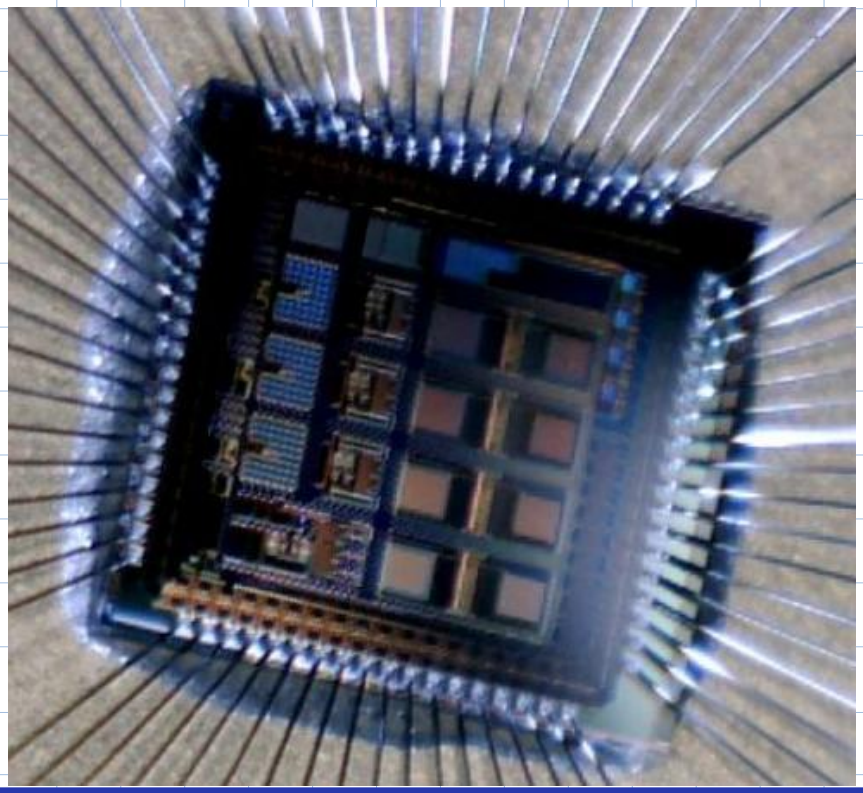
http://transistor.ing.puc.cl

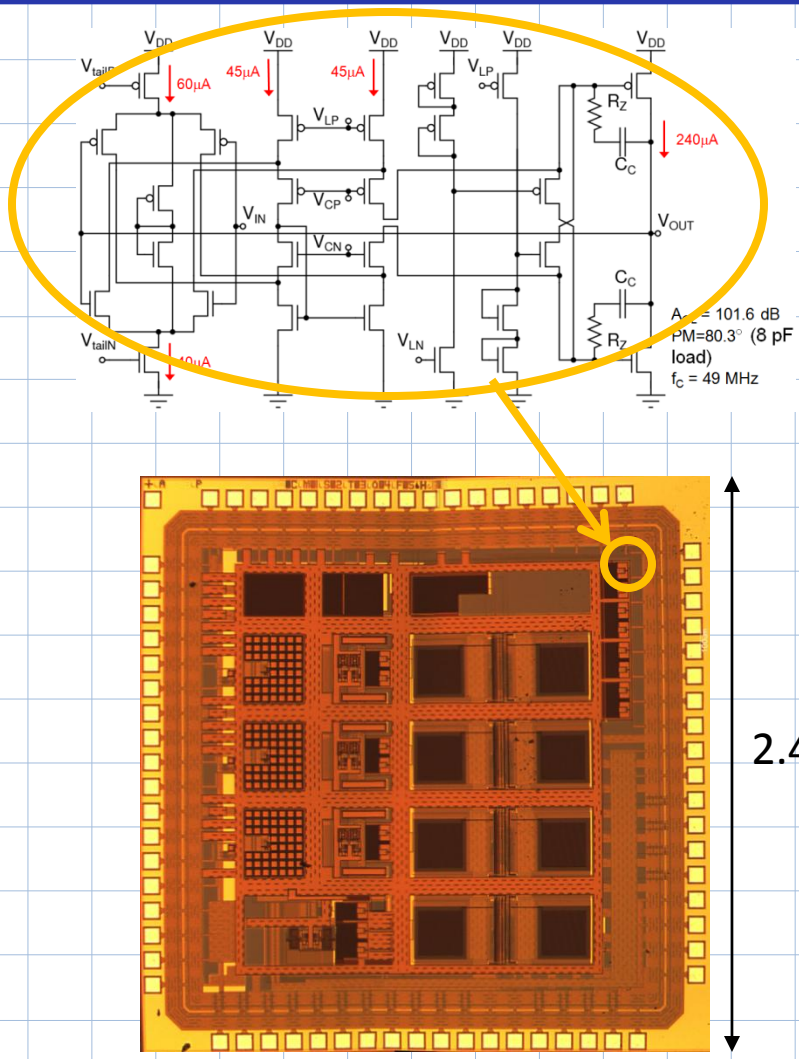
- Enfocados en desarrollo de circuitos microelectrónicos para experimentos de física de partículas

INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

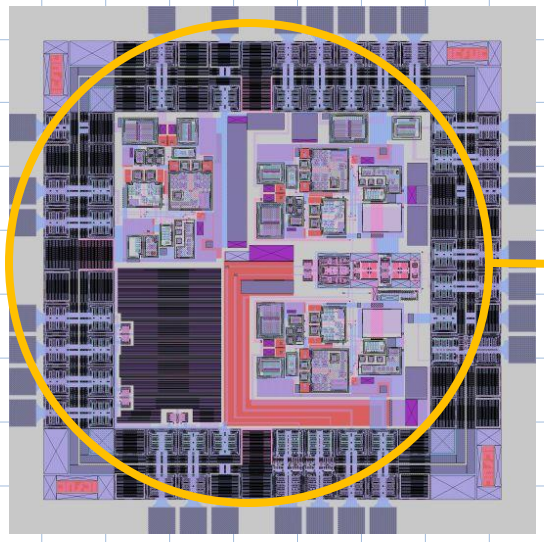
¿Qué es la microelectrónica?

La microelectrónica permite el diseño de circuitos con muuuchos transistores…

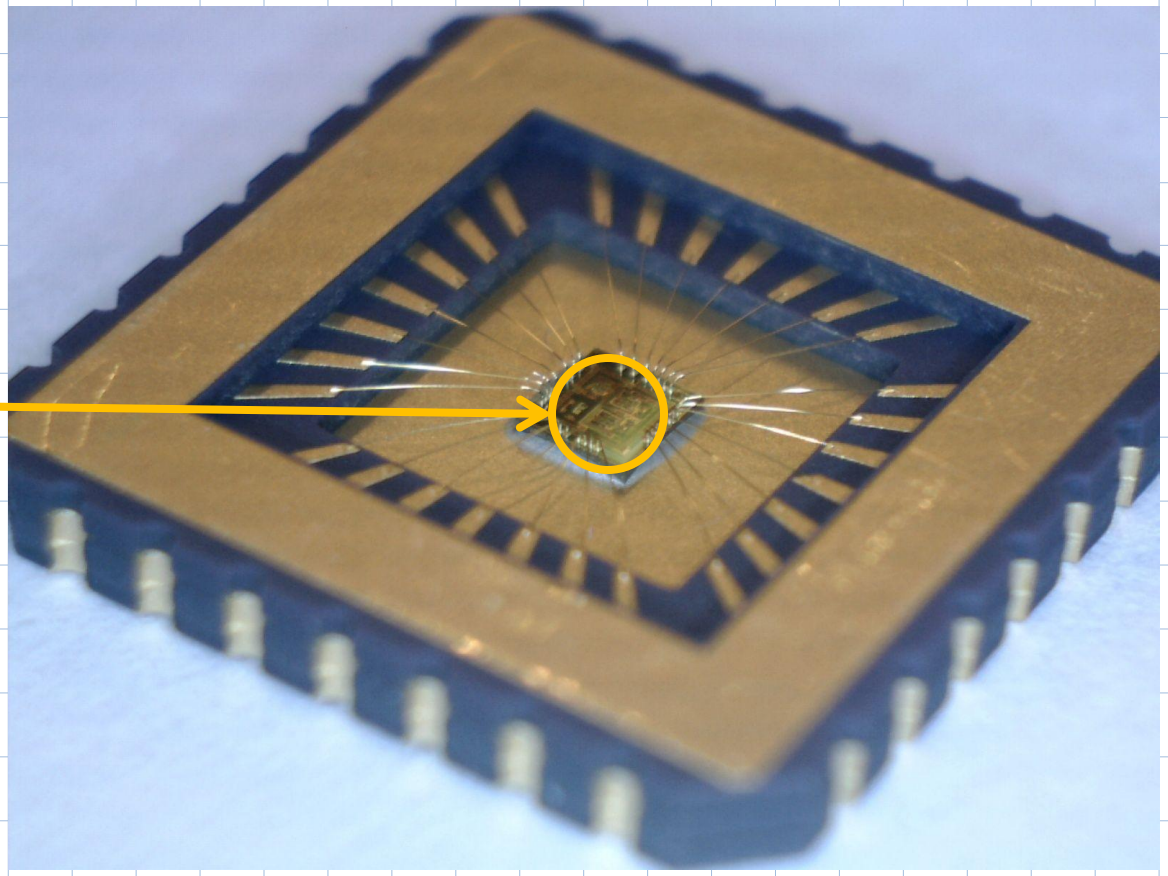




Ejemplo de chip diseñado en Chile



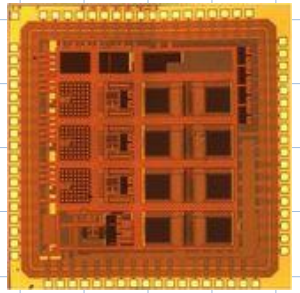
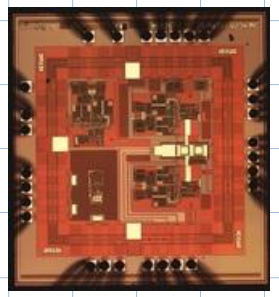
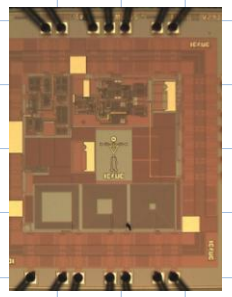
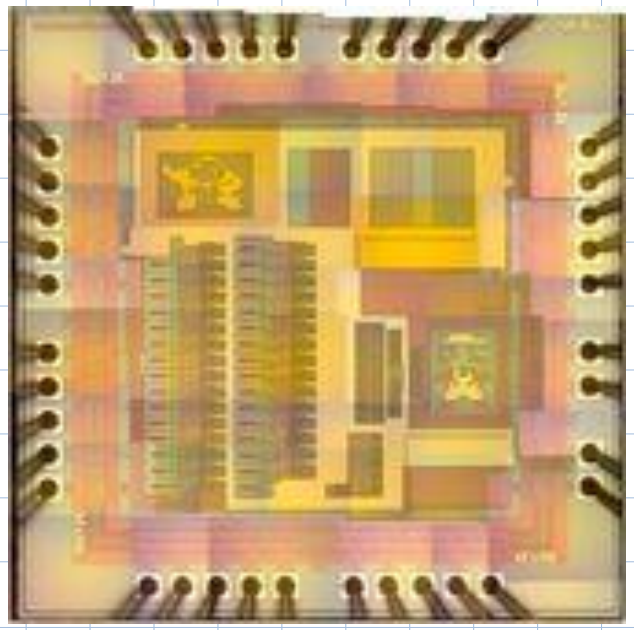
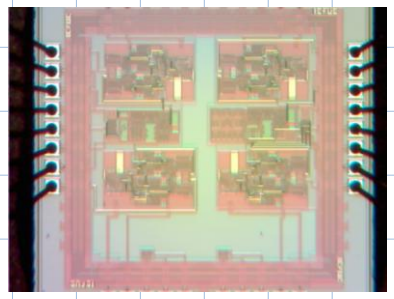
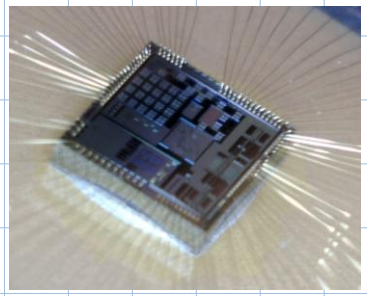
1.5mm



¿Veamos un chip en un microscopio?

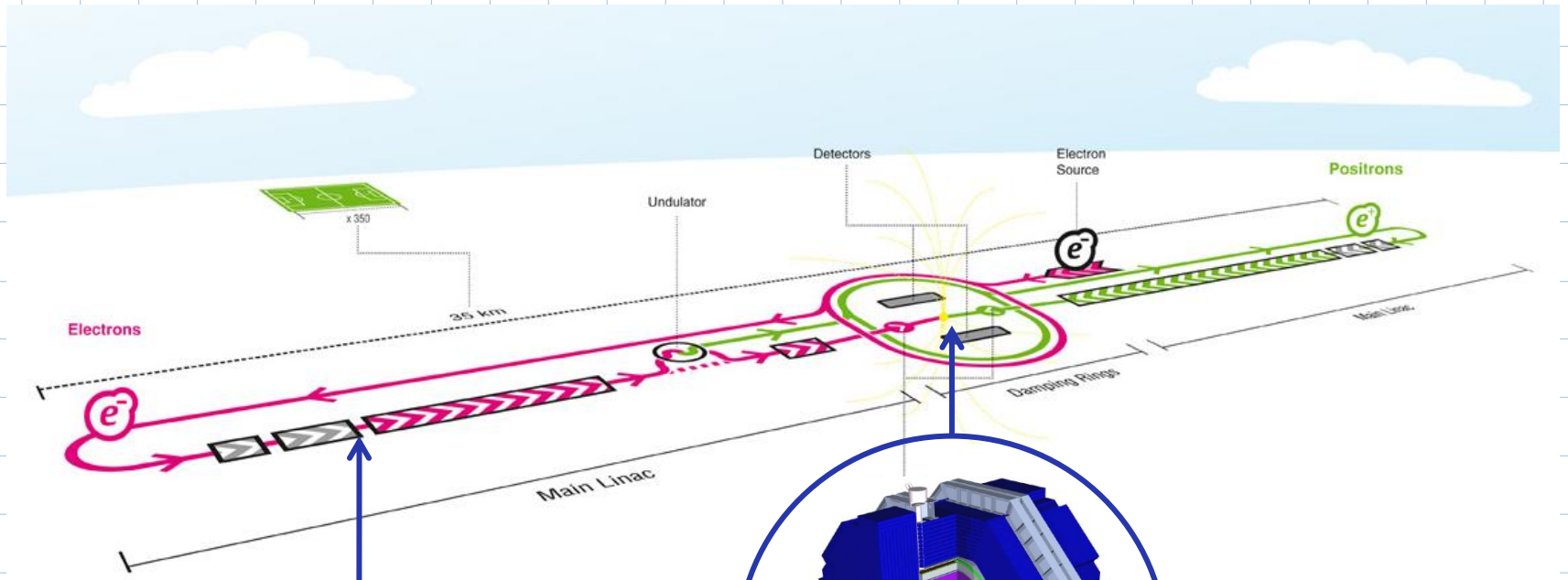
Otros chips diseñados en Chile

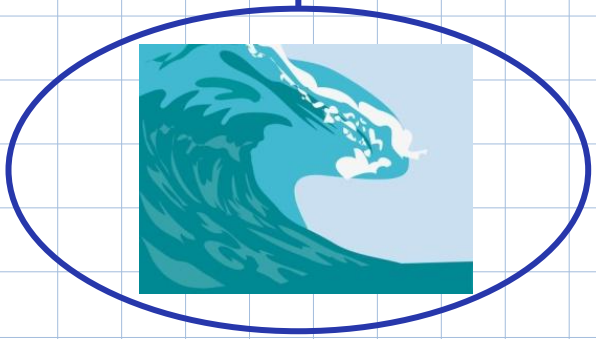
- The Bean V1 (180nm – 2009)
- Gloptat (500nm – 2012)
- Ótmil (500nm – 2012)
- Prufpilo (180nm – 2012)
- Frutlup (500nm – 2013)
- Rágil (500nm – 2013)
- Rodney (500nm – 2013)
- The Bean V2 (180nm – 2013)
- Donkicón (500nm – 2014)
- JC (500nm – 2014)
- Krebstar (500nm – 2014)
- Rondamón (500nm – 2014)
- Tikitaka (500nm – 2014)
- Subzero (180nm – 2014)
- Prez (500nm – 2015)
- Heisenberg (500nm – 2015)
- Raiden (130nm – 2015)
- Cutie (500nm – 2016)

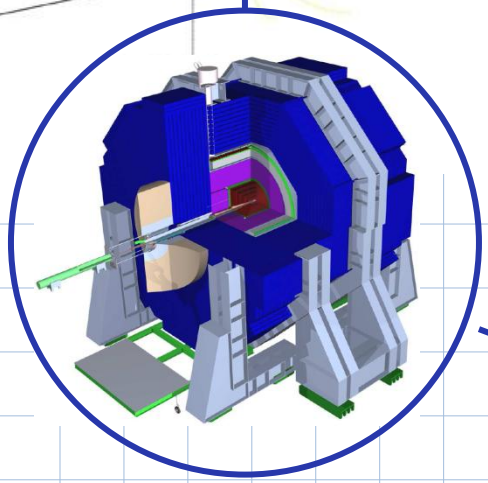
¿Y cómo diseñamos chips?

Experimentos de física de partículas: los microscopios más potentes del mundo





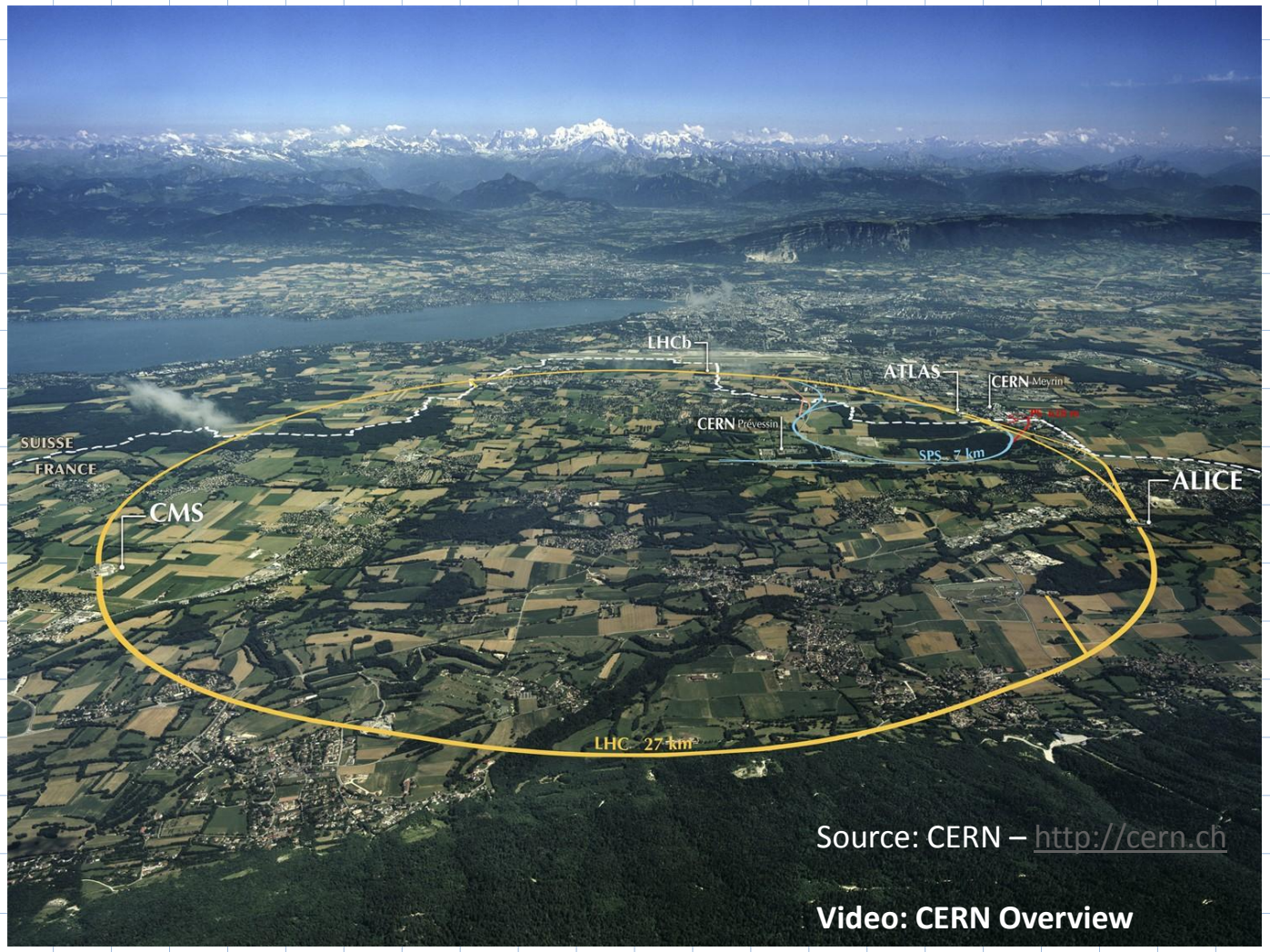
Acelerador



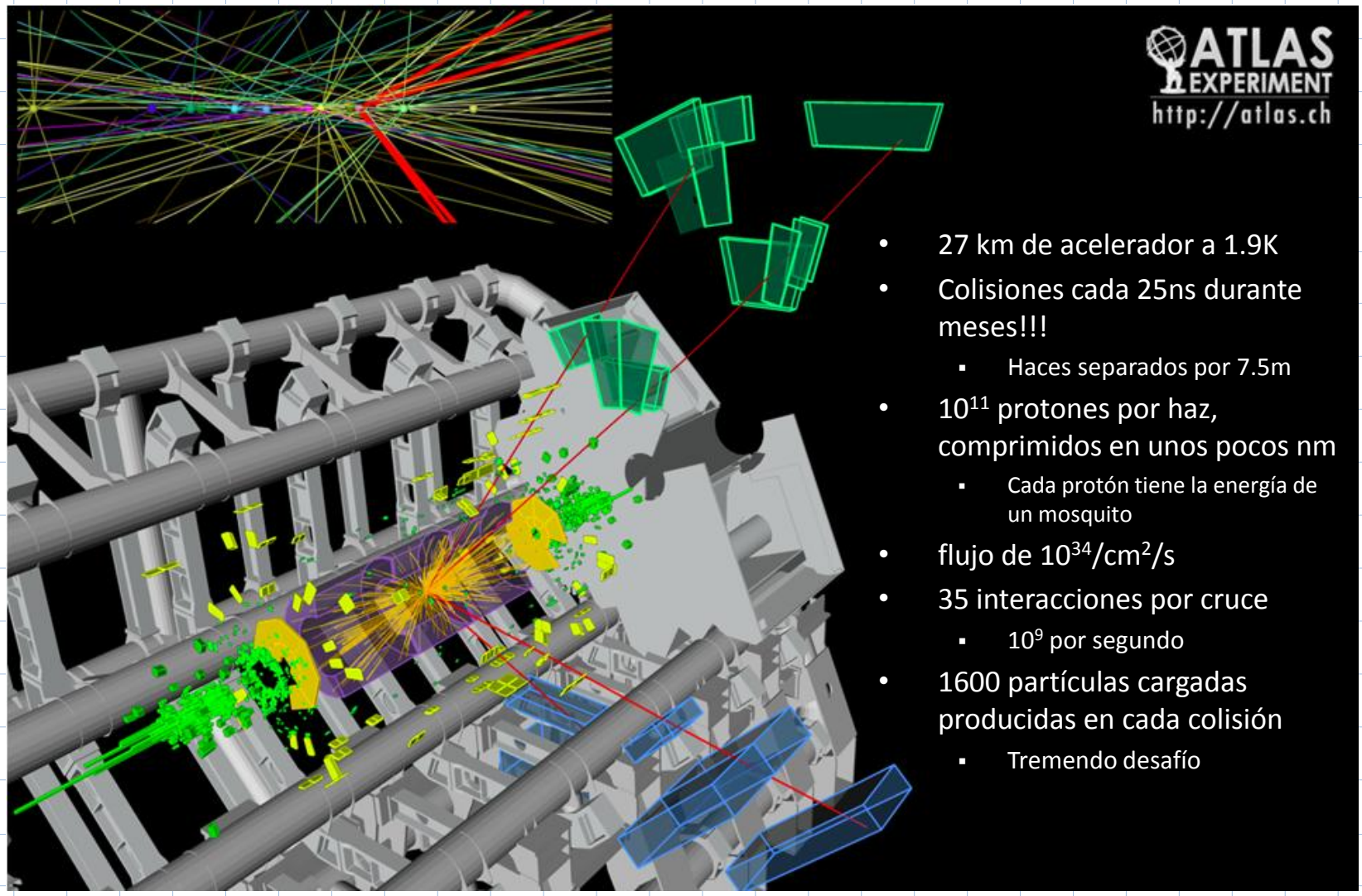
Detector

Procesamiento

Ejemplo: experimentos en el CERN



Algunos números interesantes…

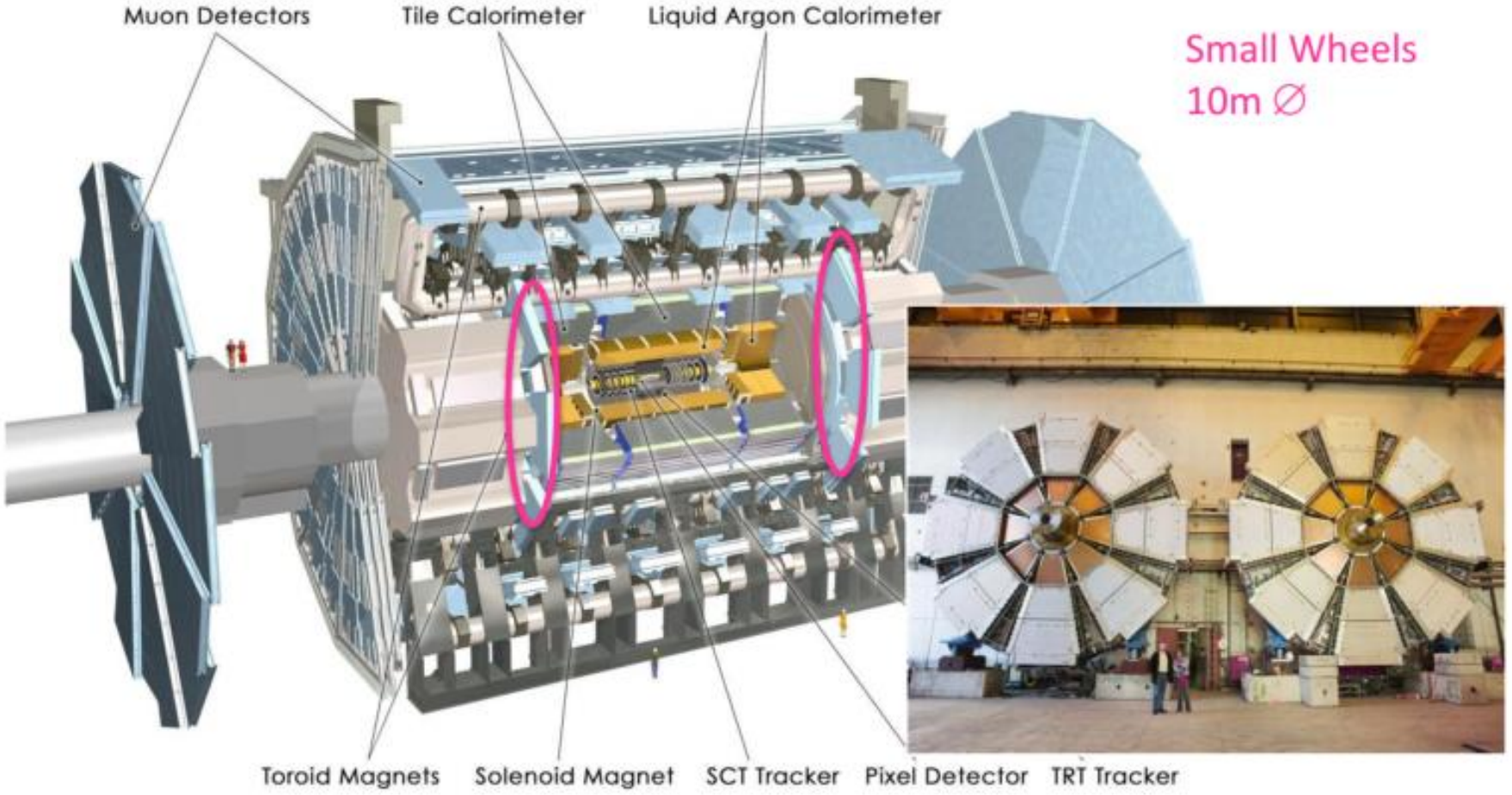


- 27 km de acelerador a 1.9K
- Colisiones cada 25ns durante meses!!!
  - Haces separados por 7.5m
- 10^{11} protones por haz, comprimidos en unos pocos nm
  - Cada protón tiene la energía de un mosquito
- flujo de $10^{34}/cm^2/s$
- 35 interacciones por cruce
  - 10^9 por segundo
- 1600 partículas cargadas producidas en cada colisión
  - Tremendo desafío

ATLAS

- Uno de los cuatro experimentos principales del LHC; también es el detector del experimento y el nombre de la colaboración que lo mantiene
- Es el experimento que demostró la existencia del campo de Higgs a través de la materialización y medición del bosón de Higgs
- ~3000 personas repartidas en >35 países

El detector de ATLAS

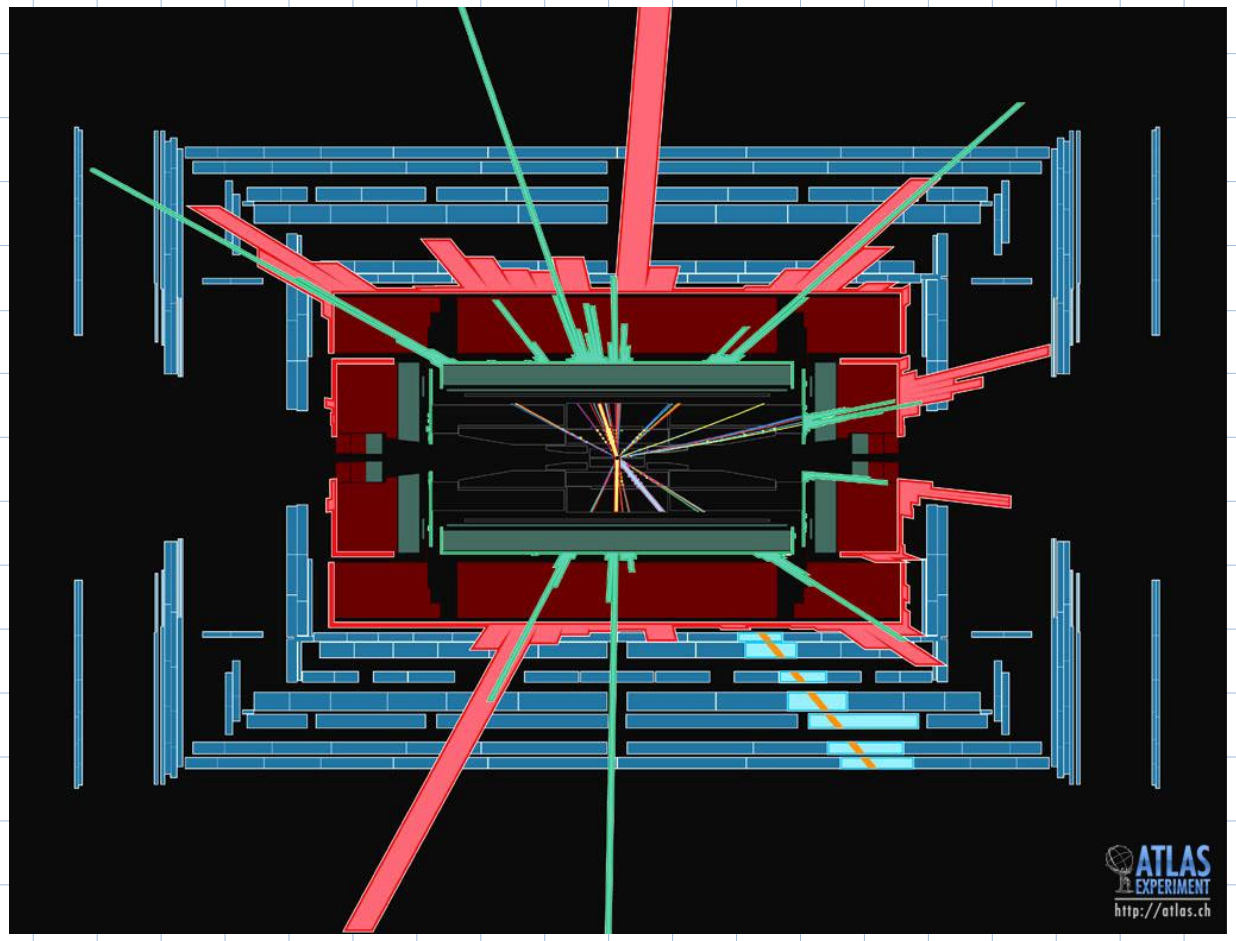


¡Tremendo detector!

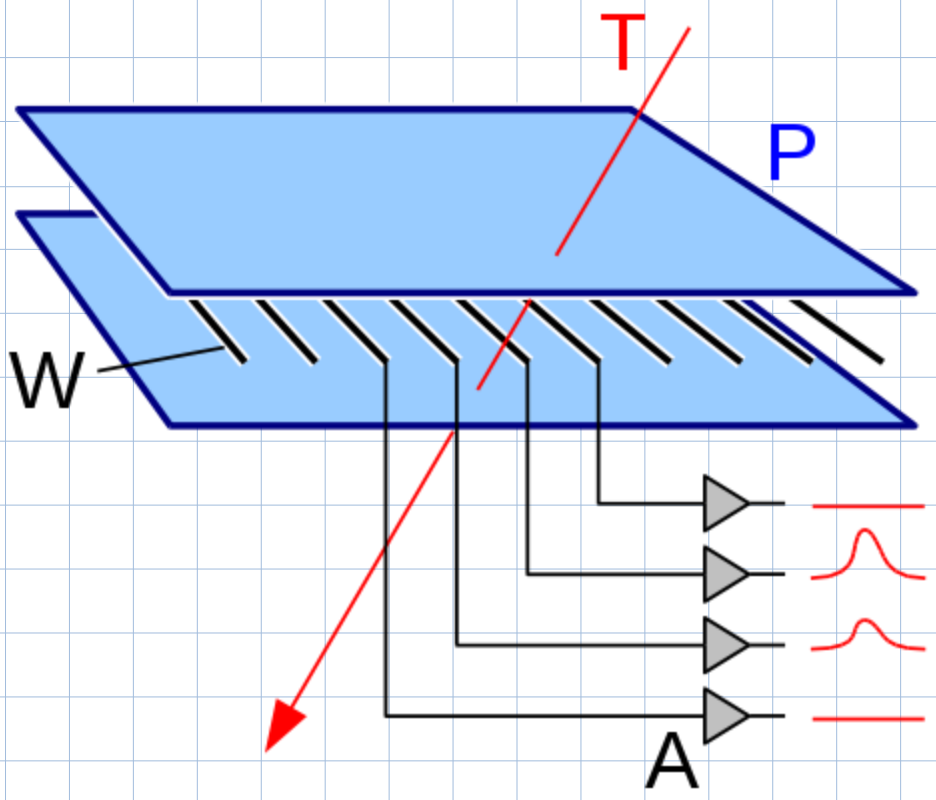
Veamos un video: ATLAS events

¿Cómo funciona un detector de partículas?

- Muchas capas
- Cada una se encarga de un tipo de partículas
- Campos magnéticos desvían partículas cargadas y permiten inferir su momentum

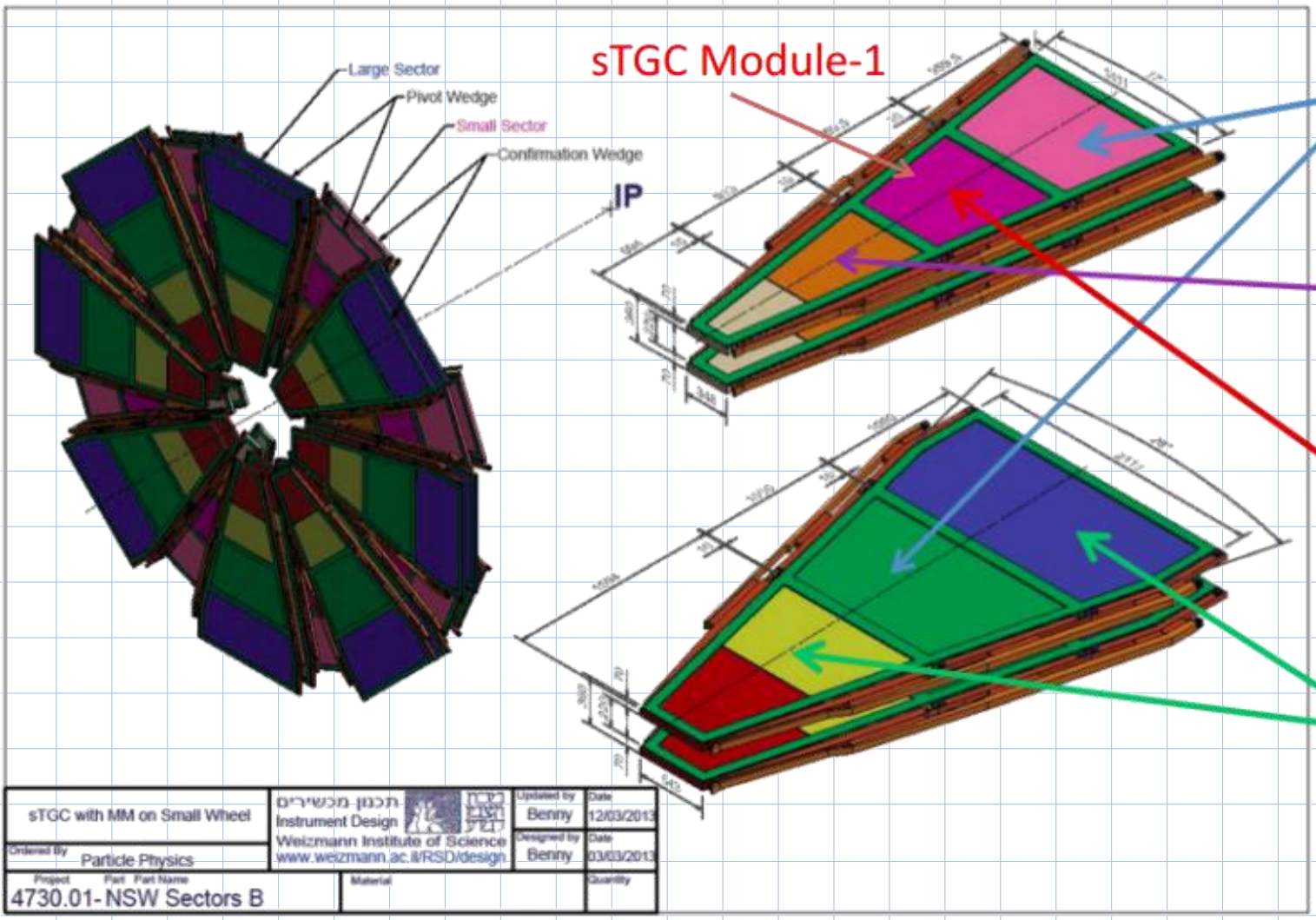


¿Cómo funciona un multi-wire proportional chamber?



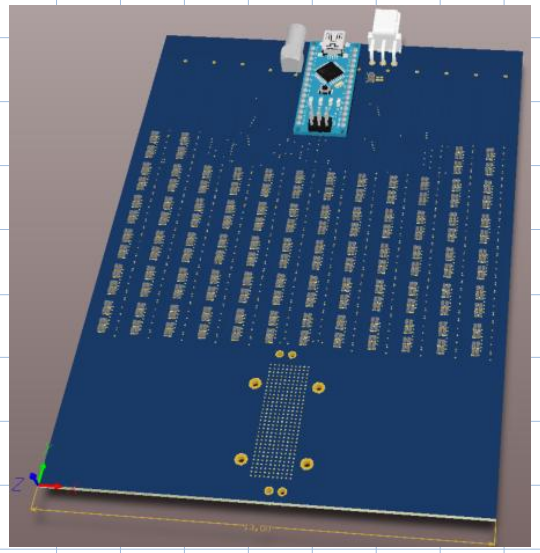
¿Dónde podemos comprar un detector de partículas?

Nuestra participación en ATLAS:
Fabricación y control de calidad de sTGC; diseño de front-end

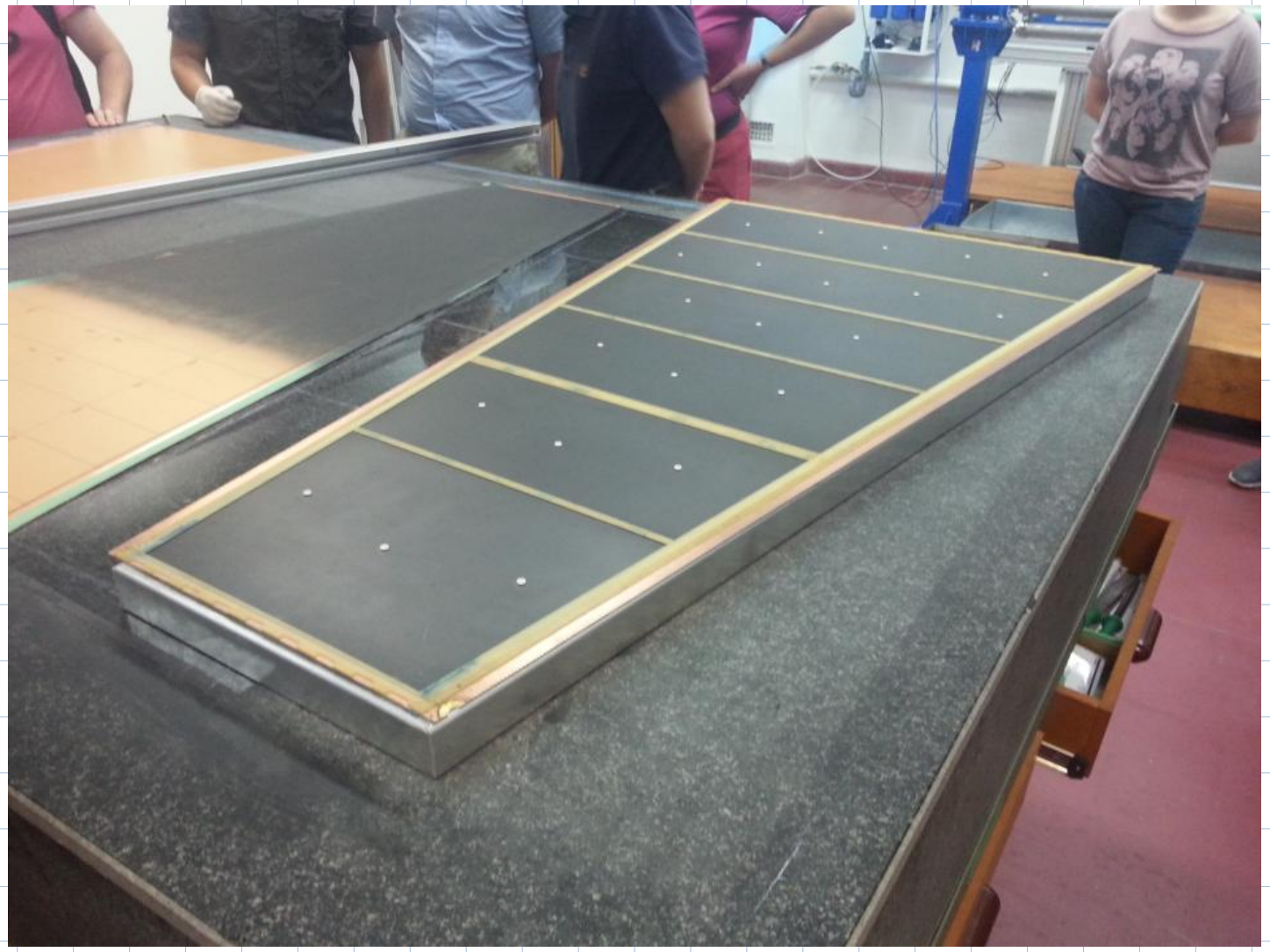


- **Canada**
  64 quadruplets +
  6 spares
- **Chile**
  32 quadruplets +
  3 spares
- **China**
  32 quadruplets +
  3 spares
- **Israel**
  64 quadruplets +
  6 spares

sTGC: small Thin Gap Chambers



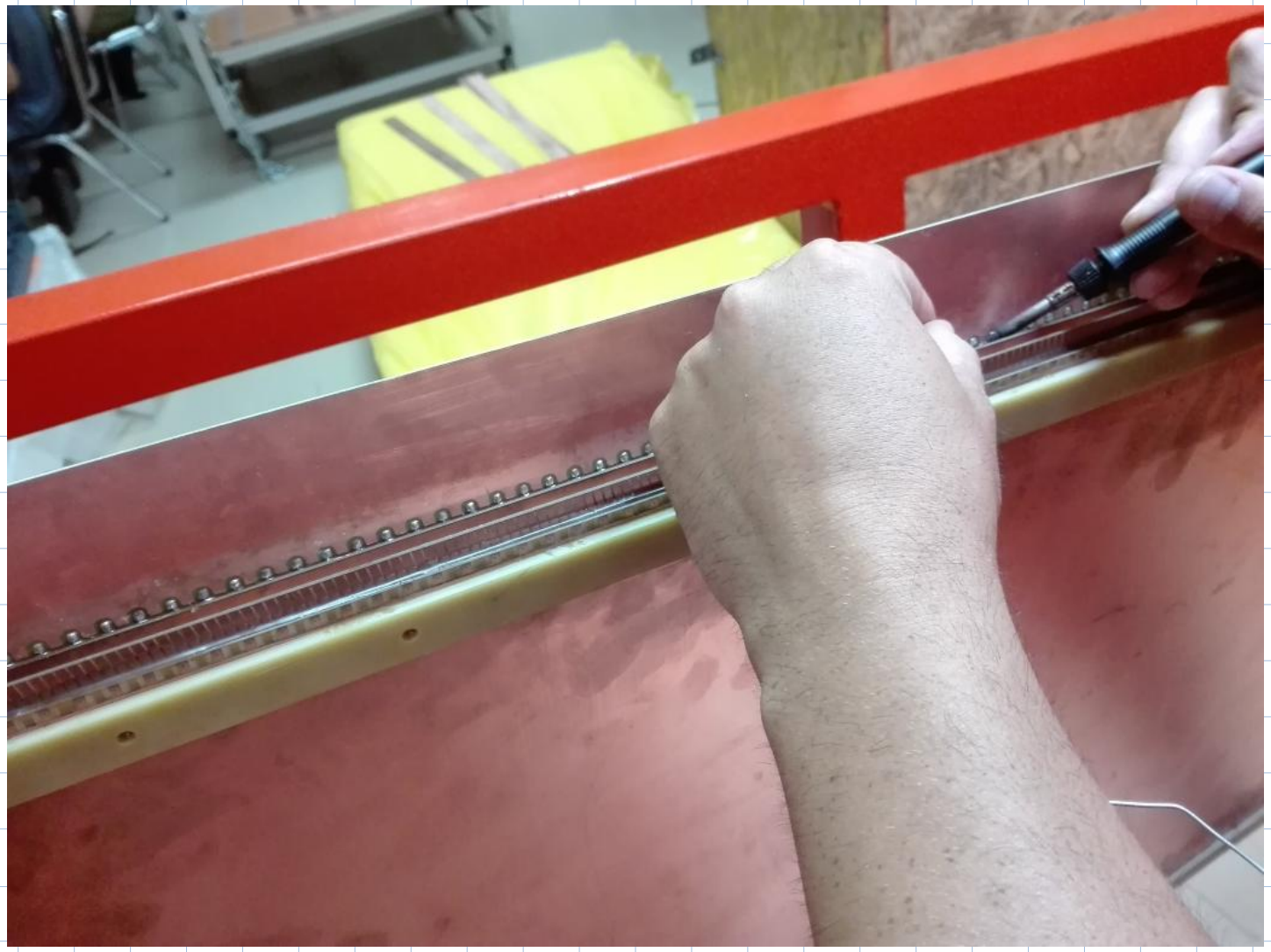
Fabricación de las sTGC en la UTFSM



Fabricación de las sTGC en la UC

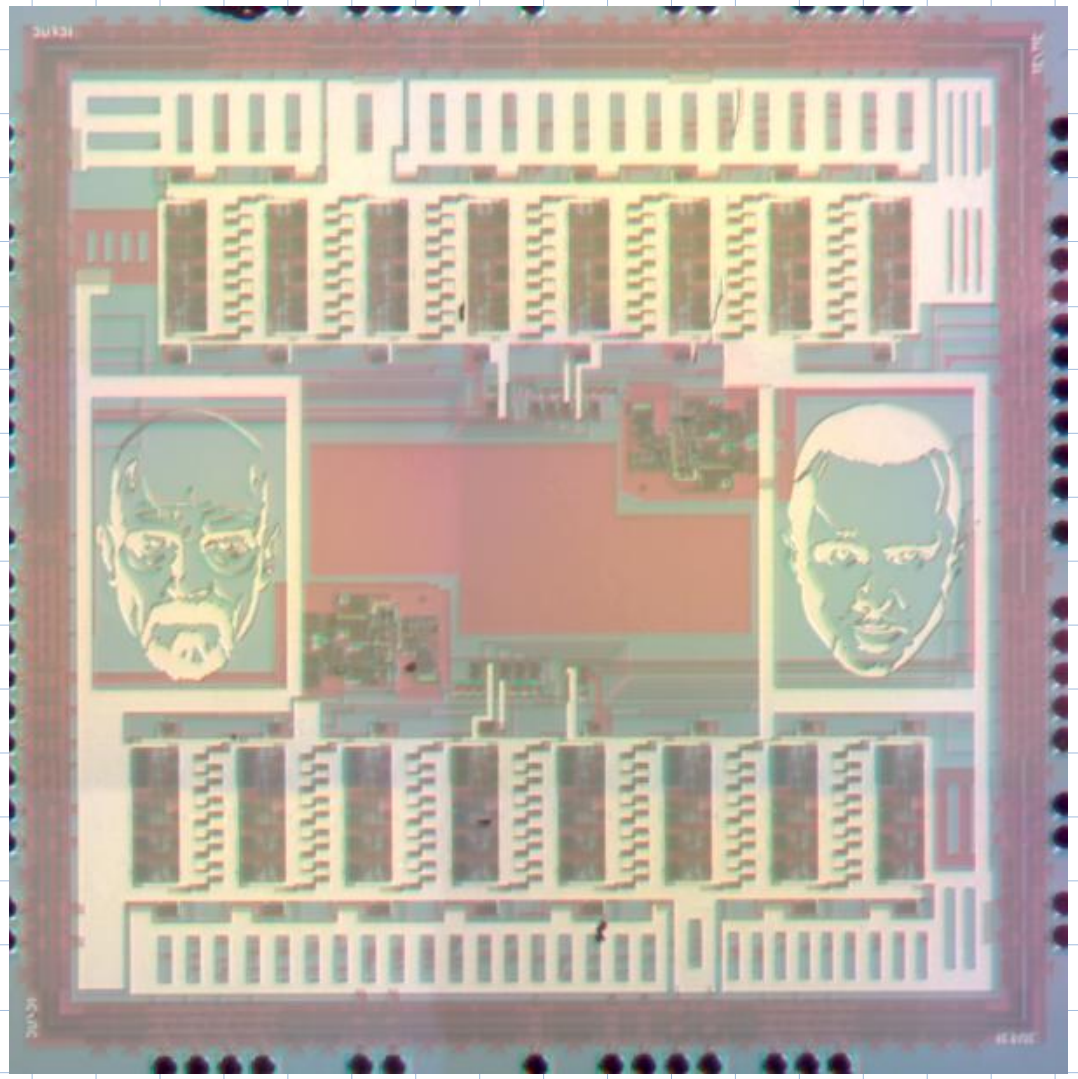
Fabricación de las sTGC en la UC

Fabricación de las sTGC en la UC

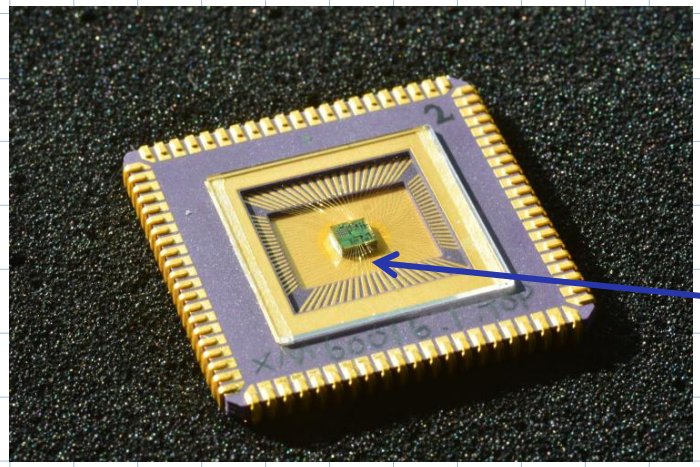


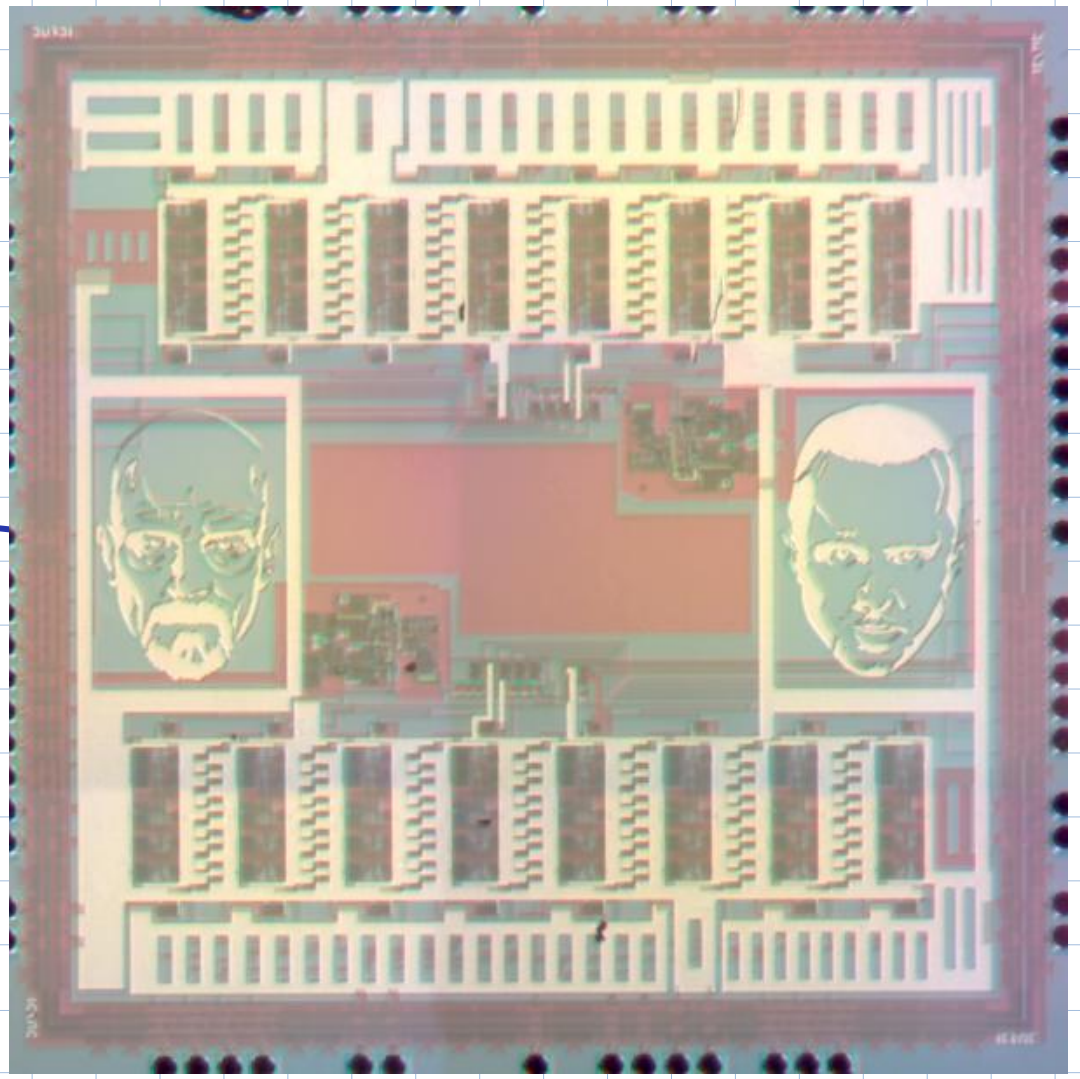
Chip para leer sTGC

- Prueba de concepto
- Permite reconfigurar los amplificadores para adaptarse a diferentes detectores
- Actualmente en fase experimental

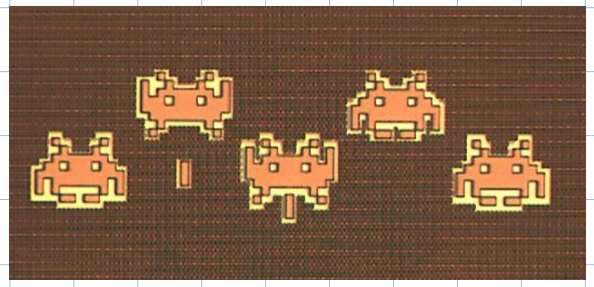


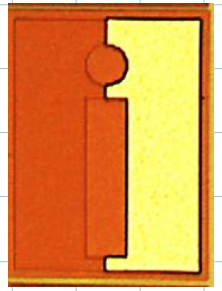
¿Arte circuital?

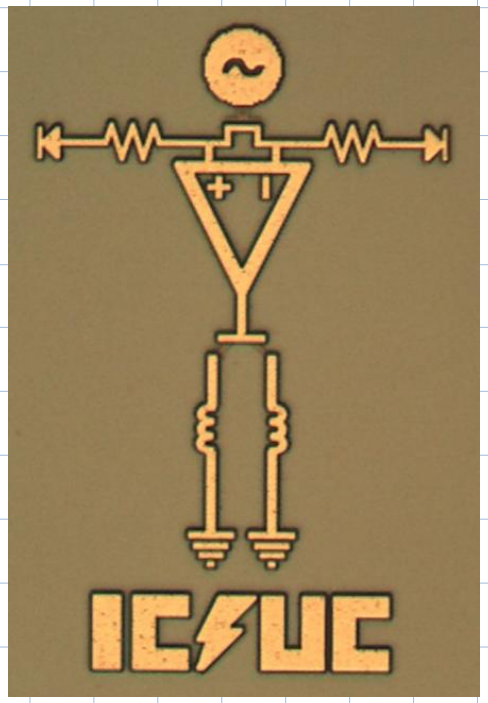


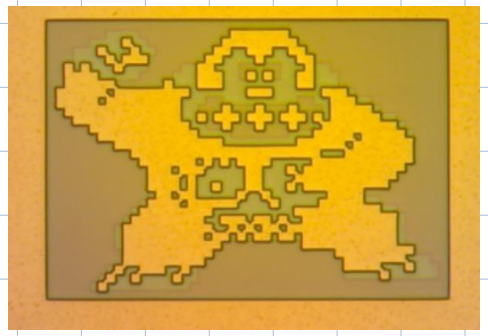


(Arte circuital chilensis – fotos reales)

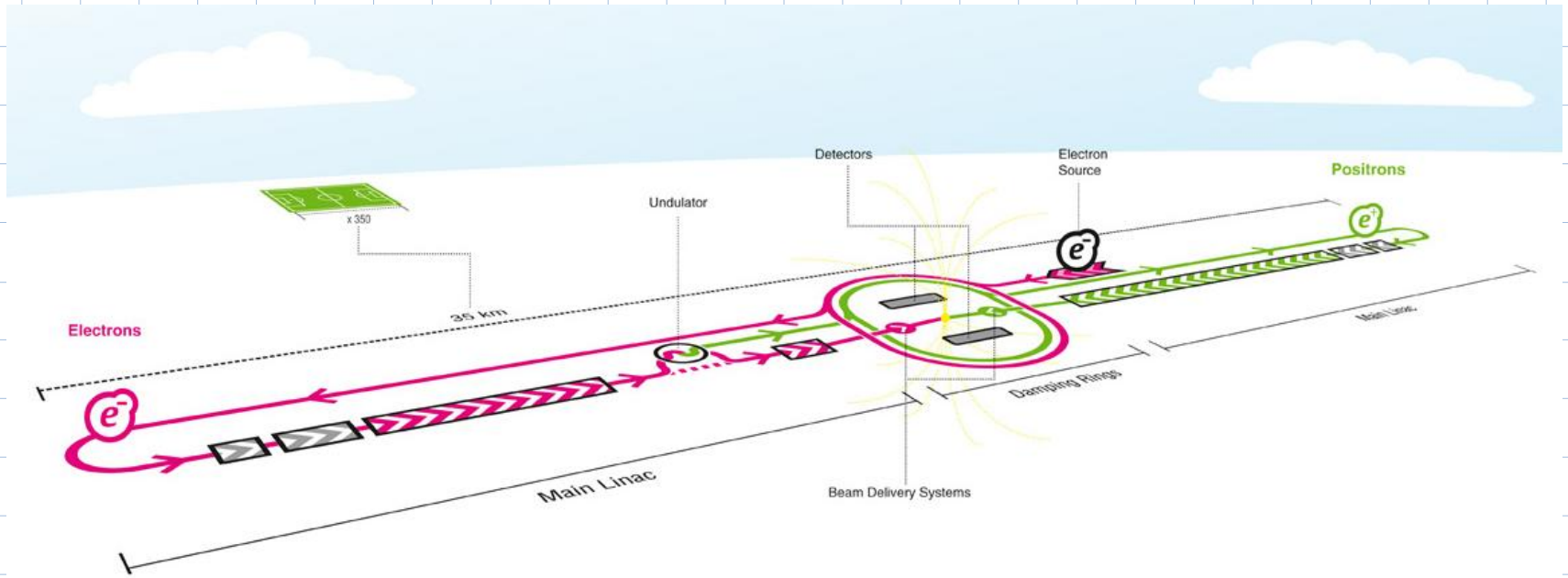








El ILC

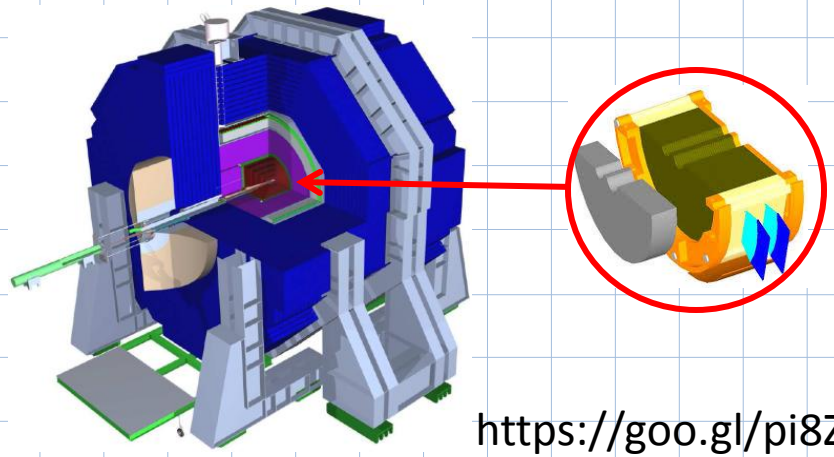


- Futuro colisionador e^+ e^-
- Posiblemente en Japón
- 30-50km
- 250+ GeV
- Aceleración mediante cavidades superconductoras

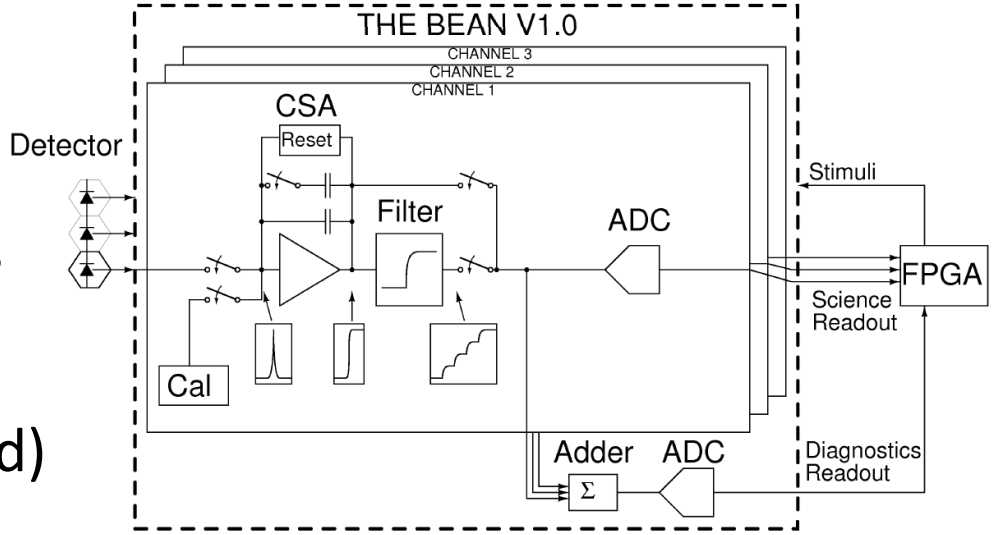
Nuestra contribución al ILC

Diseño de procesador de pulsos para física de partículas

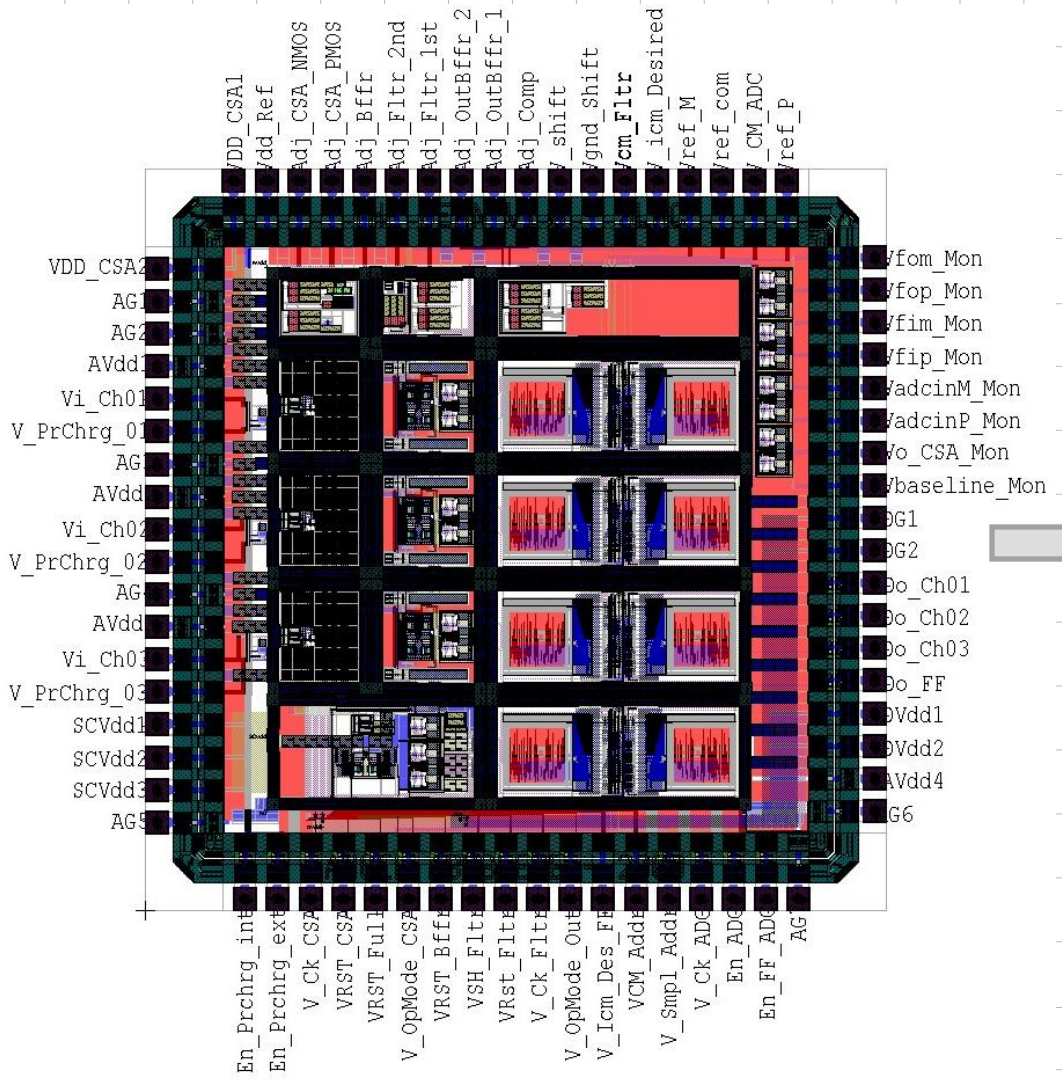
- Entrada de pulsos: 3.25MHz
- 100% ocupancia
- Entrada máxima de 37 pC por píxel por pulso
- Cap de entrada 40pF
- 10 bits de resolución
- Dos ganancias analógicas
- Salida compuesta (8-bit, 1 us de latencia) para diagnóstico de haz
- Tolerancia a radiación (1Mrad)

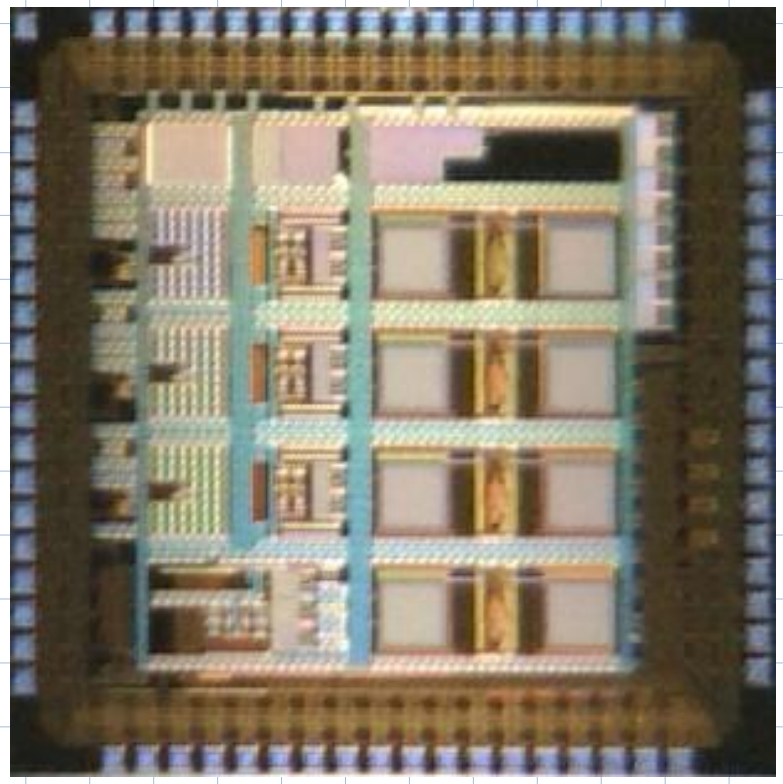


https://goo.gl/pi8Z2i

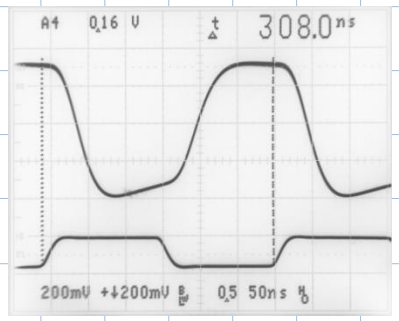


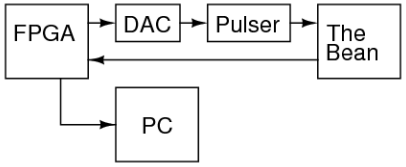
Resultado: The Bean V1 (2009)

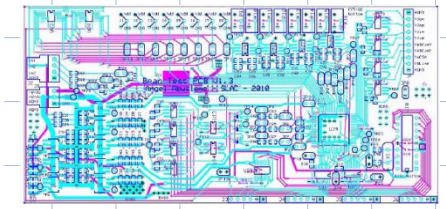


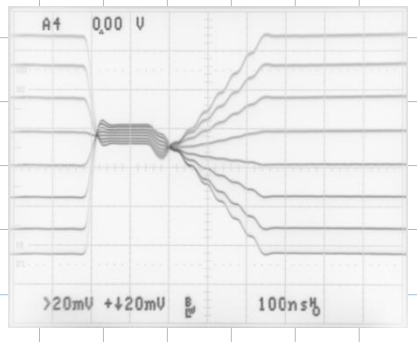


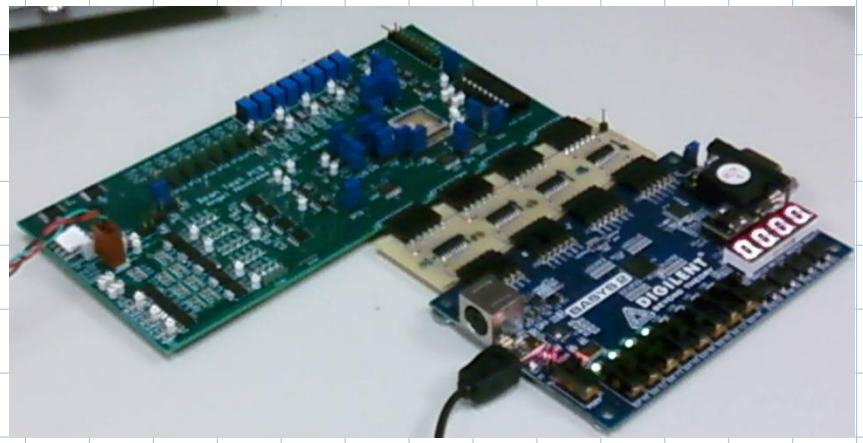
Pruebas experimentales

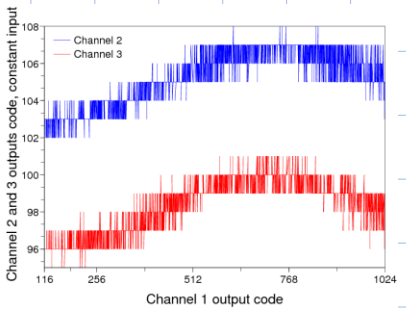


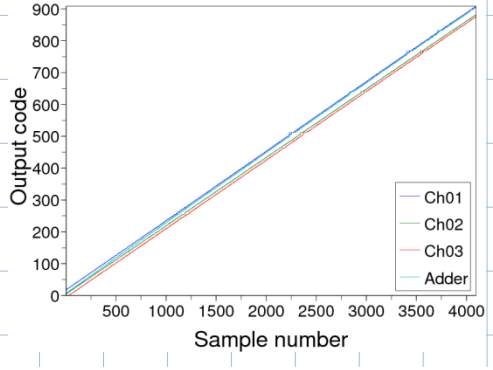


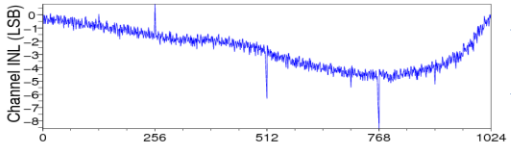


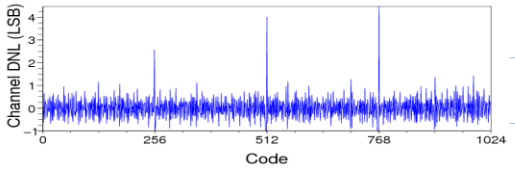


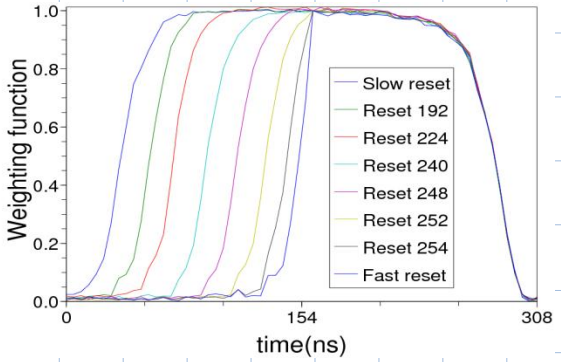


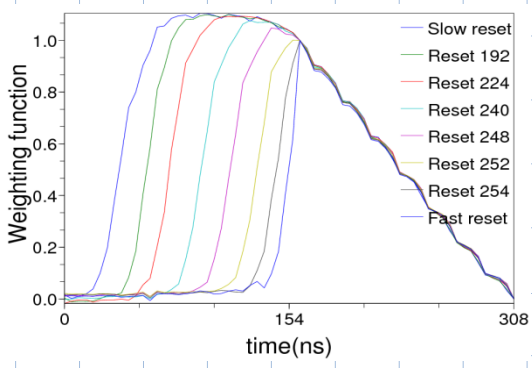






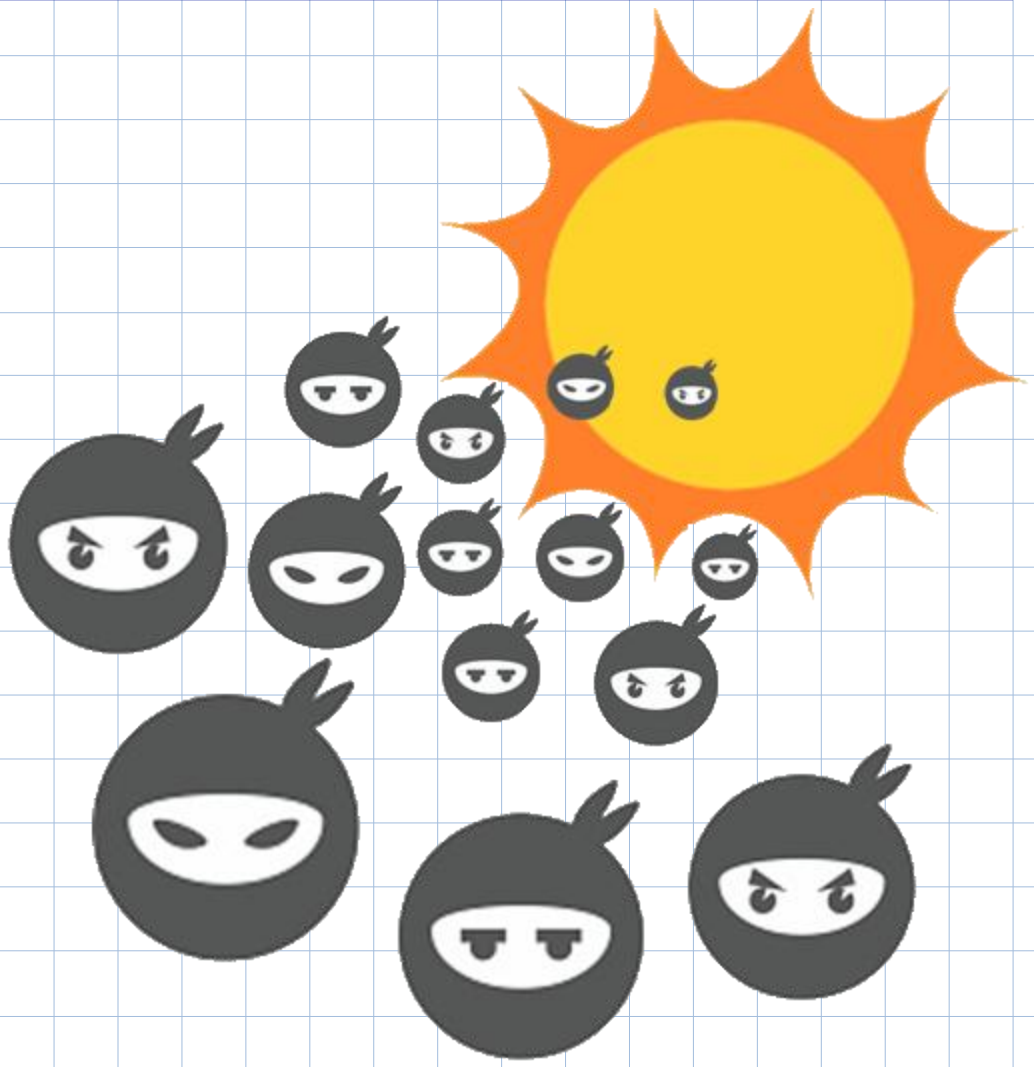




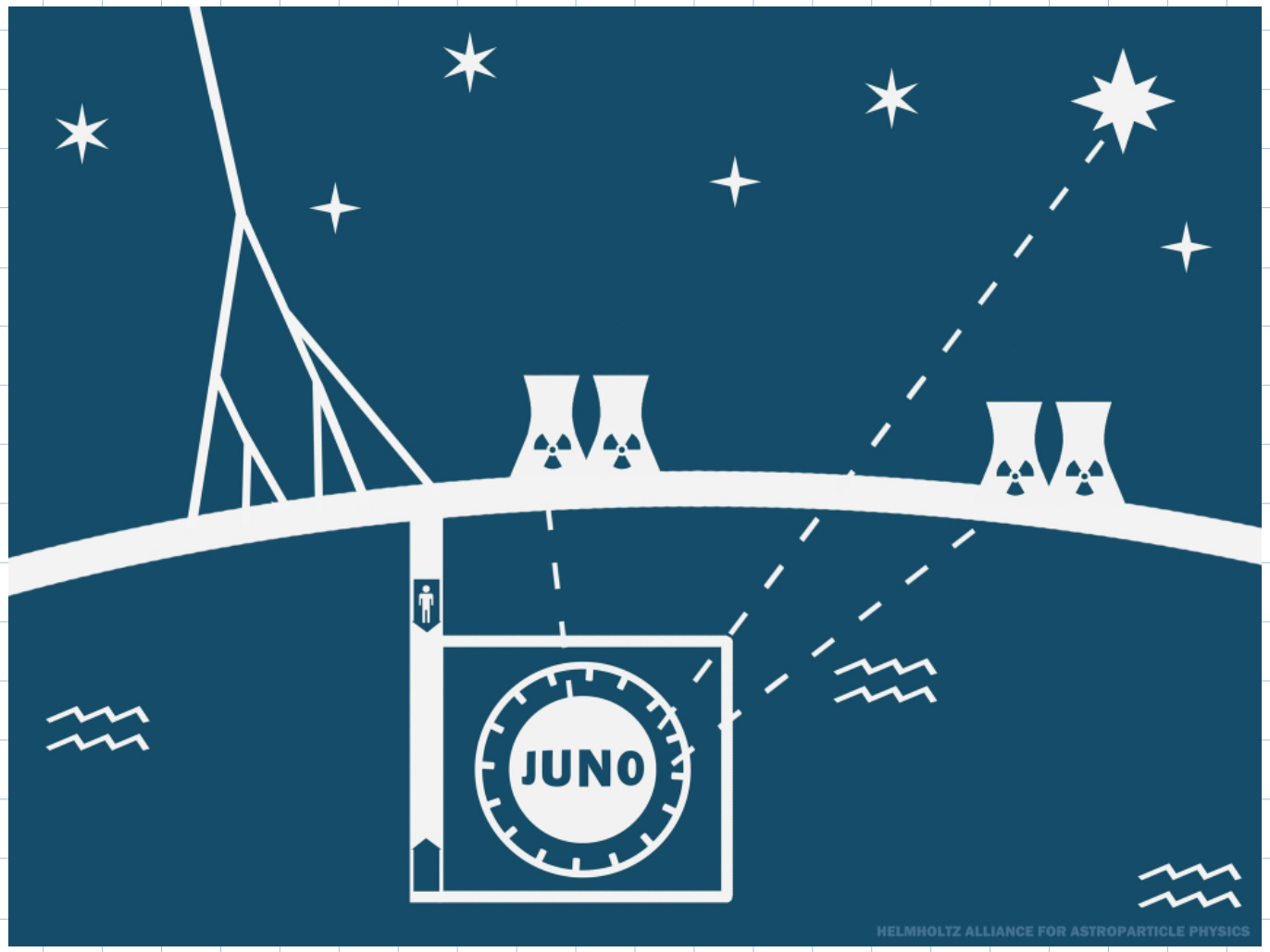


Neutrinos

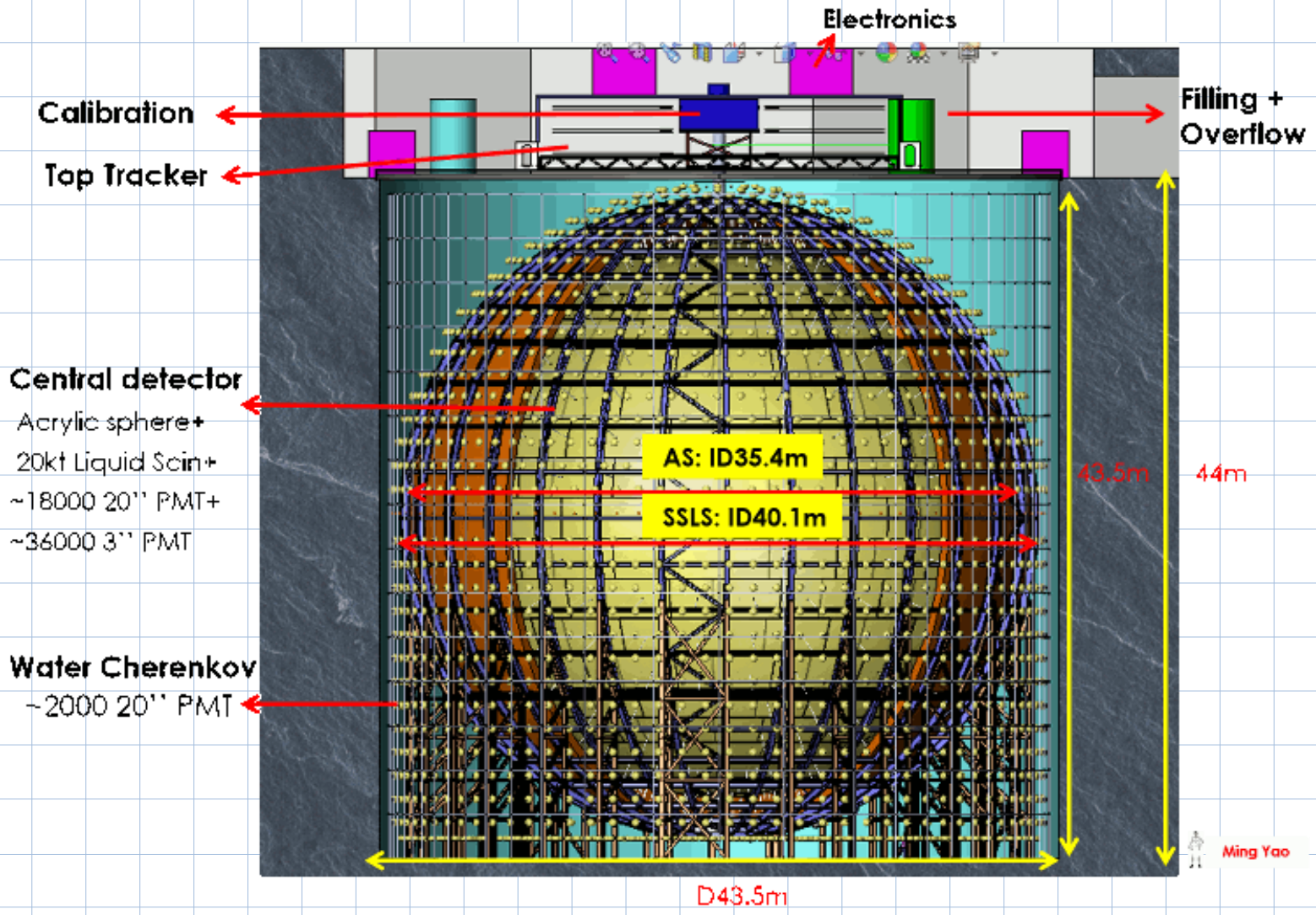
- ¿Qué son los neutrinos?
- ¿Hay neutrinos cerca de nosotros?
- ¿Cuántos tipos de neutrinos existen?
- ¿Qué sabemos acerca de la masa de los neutrinos?



JUNO:
Jiangmen Underground Neutrino Observatory



El detector de JUNO: 20.000 toneladas de líquido centellador

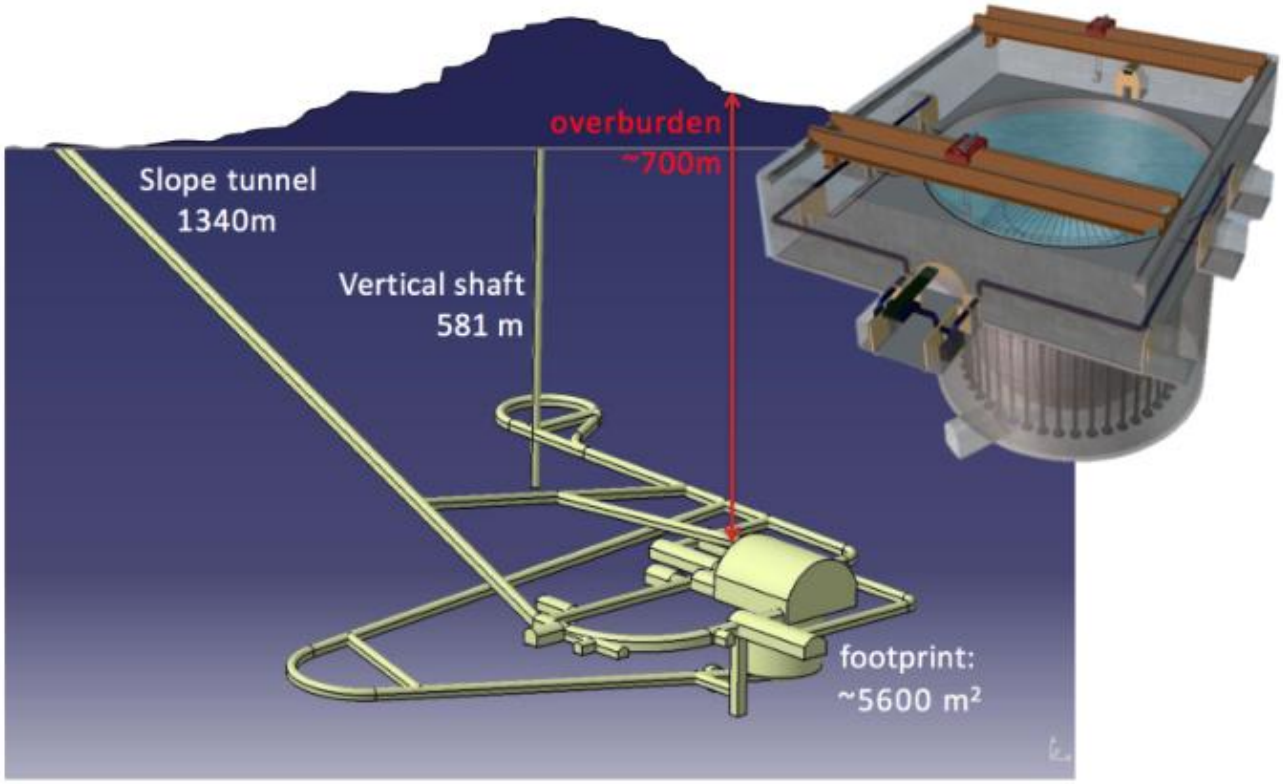


Estado de la construcción

- A new underground laboratory with a 700 m overburden has to be constructed (with infrastructure at the surface)
- The civil construction started in 2014 and is well underway

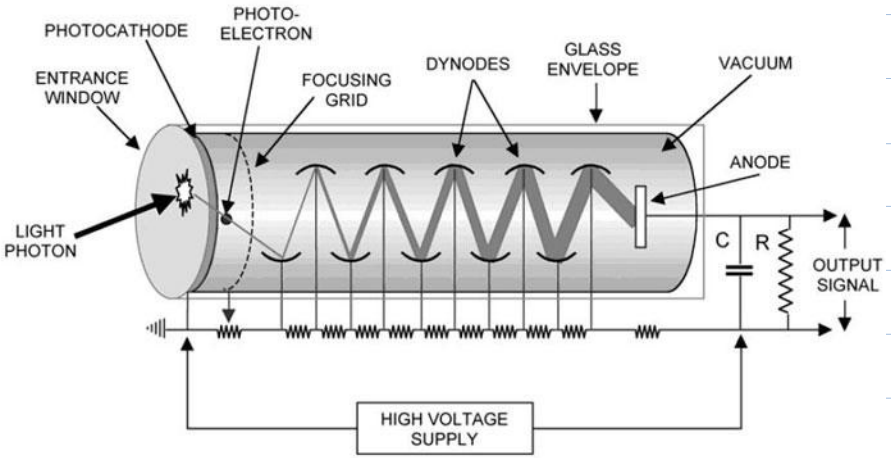
Vertical shaft completed!

Slope Tunnel completed!



Tubos fotomultiplicadores

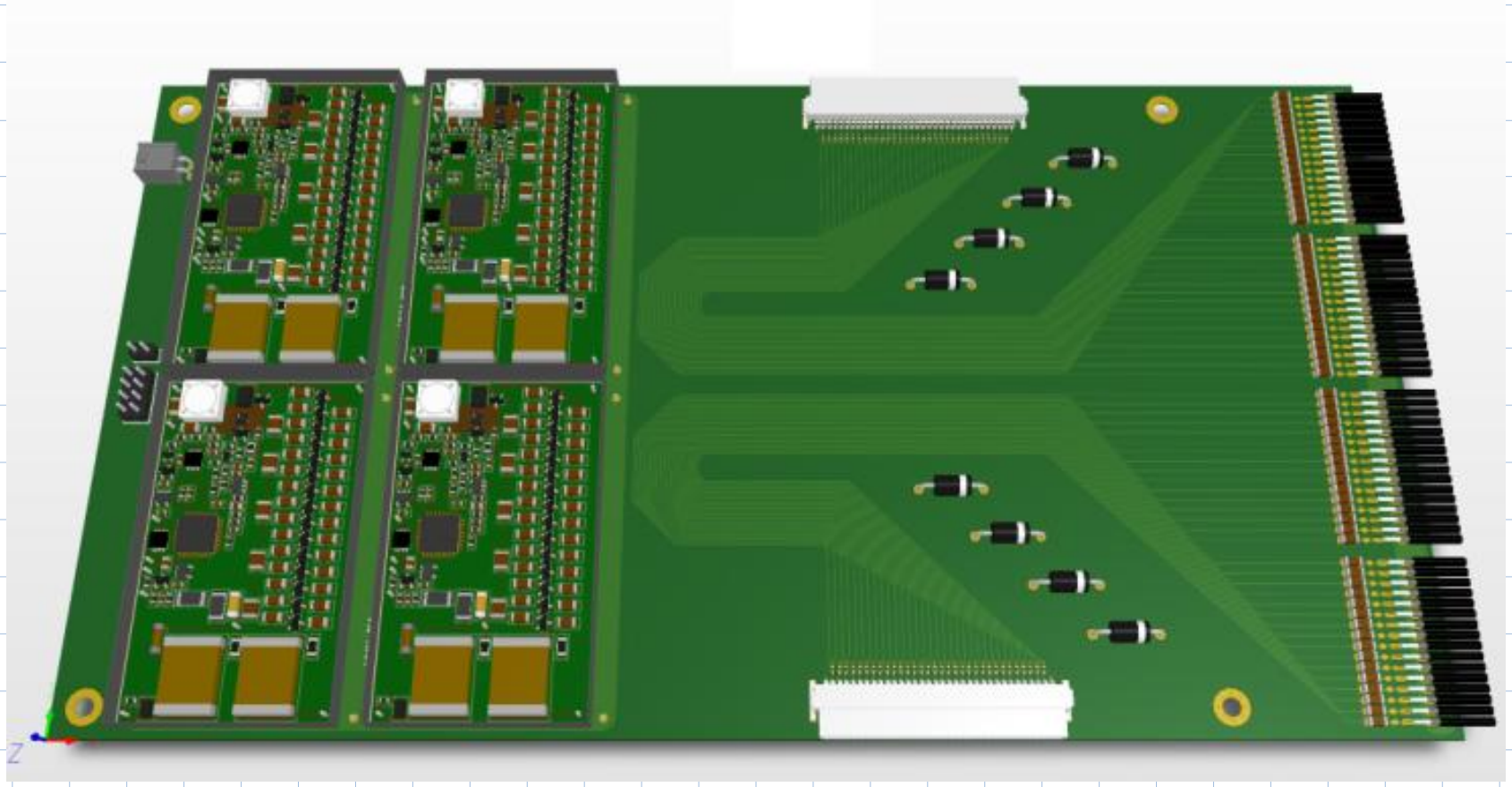
- Son como ampolletas, pero al revés:



- Requieren alto voltaje para amplificar carga
- A través de un mismo cable van las señales y la alimentación

Separador de alto voltaje

Separa señal y alimentación – 25.000 canales!



Conclusión (¿o catarsis?)

- En Chile podemos:
  - Diseñar y probar electrónica de alto desempeño
  - Diseñar y probar chips
  - Ser un aporte en proyectos científicos importantes
- En Chile nos falta:
  - Más interés en tecnología – a todo nivel
  - Más $$ para hacer investigación
  - Masa crítica en algunas áreas

Grupo de investigación IC-UC: Circuitos Integrados UC

INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

http://transistor.ing.puc.cl

Área de investigación:

Instrumentación para experimentos de física de partículas

Agradecimientos:

- Proyecto FONDECYT 1170345
- Proyecto Basal CCTVal

¡Gracias por escucharme!

Bonus track

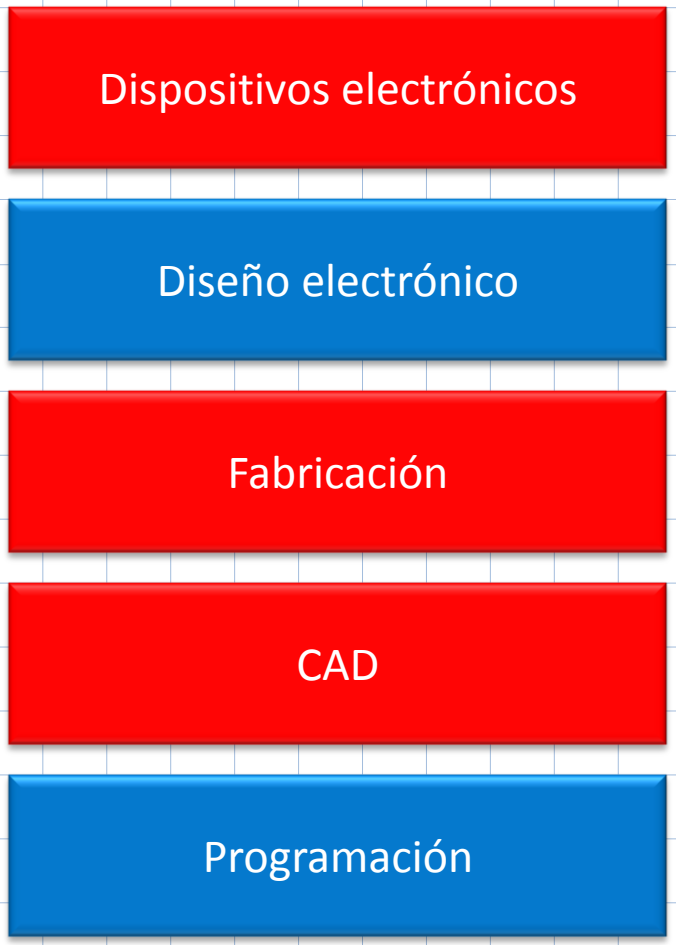
Contexto inicial - 2010

- Mucha electrónica de consumo
  - e.g. 1.23 teléfonos celulares por persona (1.03 en USA, fuente: https://goo.gl/p650a2)
  - ~67% penetración de Internet (la mayor en Latinoamérica, fuente: http://goo.gl/KJ33HK)
- Pero muy pocas empresas de diseño electrónico
  - Unas 10 empresas que diseñan electrónica
    - Muy poco en diseño analógico
    - No hay diseño de chips
    - No hay fábricas (sólo PCBs)
    - No hay manufactura de electrónica de consumo
- En 1994, Intel consideró instalar una fábrica en Chile
  - Pero prefirió Costa Rica
  - No hubo incentivos por parte del gobierno de Chile
- Buenas noticias:
  - Synopsys
  - Masa crítica…?

Contexto inicial – PUC Chile

- Programa de ingeniería eléctrica, ~15 profesores
  - Automática y robótica
  - Comunicaciones
  - Energía y potencia
  - Instrumentación astronómica
  - Ingeniería biomédica
- Educación básica en electrónica
  - Analógica y digital
  - Laboratorios para docencia e investigación

Estrategia para una batalla perdida



- Enfocarnos solamente en áreas que podemos implementar en Chile
- Servicios externos permitirían cubrir otras áreas

Docencia – Programa de cursos

Analógica y señales mixtas

- IEE2123 Circuitos
- IEE2413 Electrónica
- IEE2473 Lab. de electrónica A&D
- IEE3423 Diseño y caracterización de circuitos integrados
- IEE3433 Diseño de circuitos integrados analógicos
- IEE3443 Diseño de conversores de datos VLSI

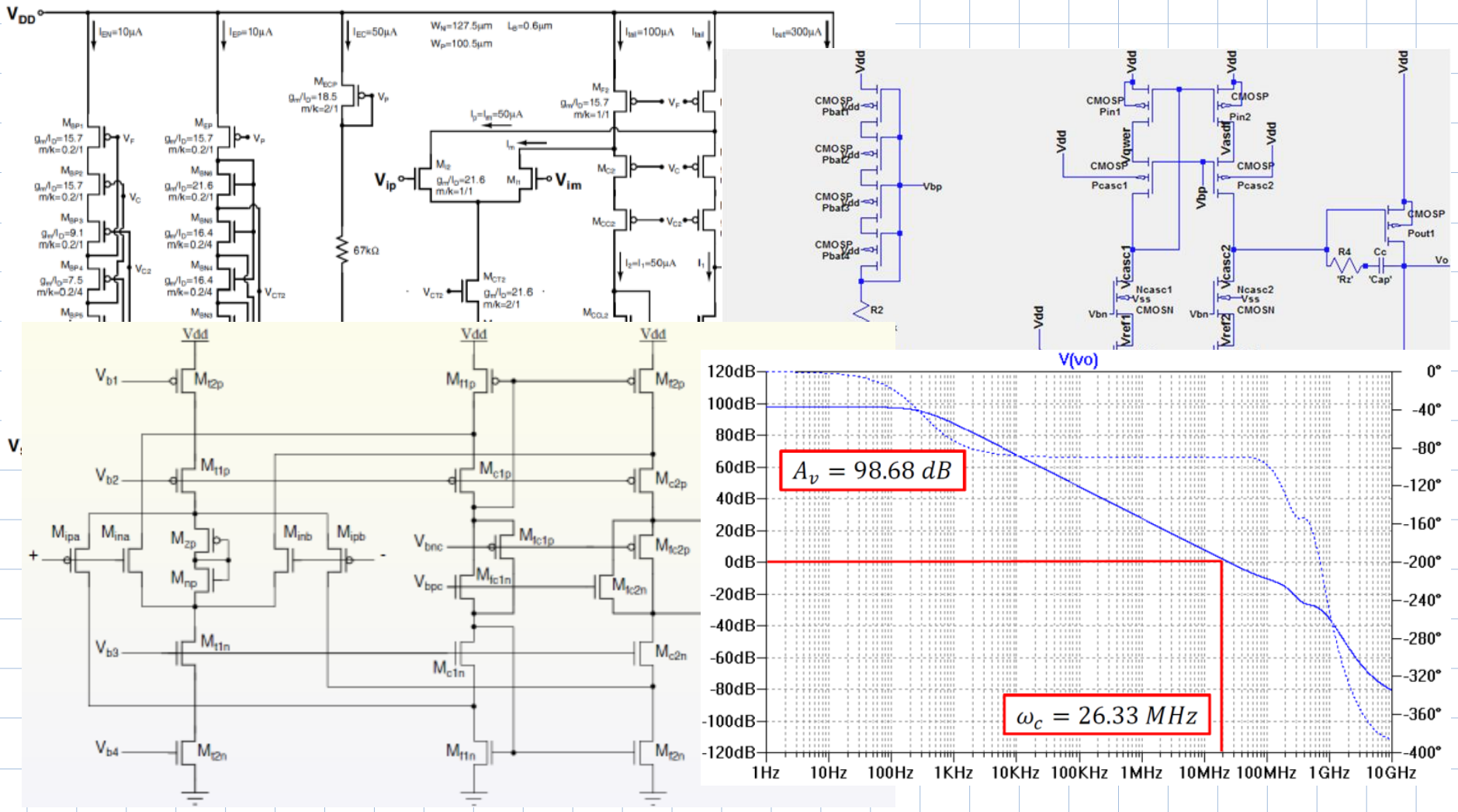
Digital

- IEE2713 Sistemas digitales
- IEE2473 Lab. de electrónica A&D
- IEE2463 Sistemas Electrónicos Programables
- IEE3753 Diseño de circuitos integrados digitales
- IEE3423 Diseño y caracterización de circuitos integrados

Estructura general de los cursos

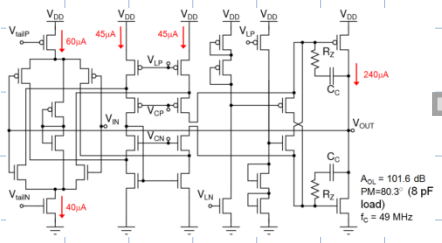
- Clases lectivas, 2 horas semanales durante un semestre
  - Videos disponibles en youtube: https://goo.gl/HGi6mr
- Sesión de problemas, 1 hora semanal
- 2 a 4 Pruebas escritas
- Un examen oral
- 6 a 12 tareas
  - Análisis
  - Diseño
  - Simulación
- Proyecto de diseño

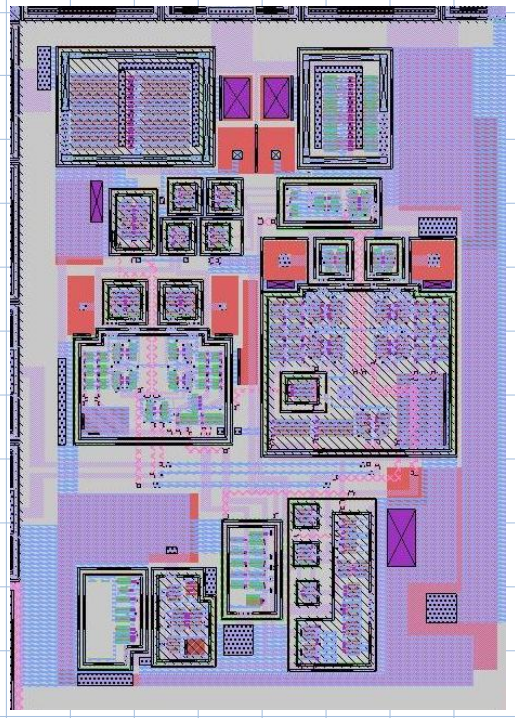
Ejemplos de proyecto de diseño

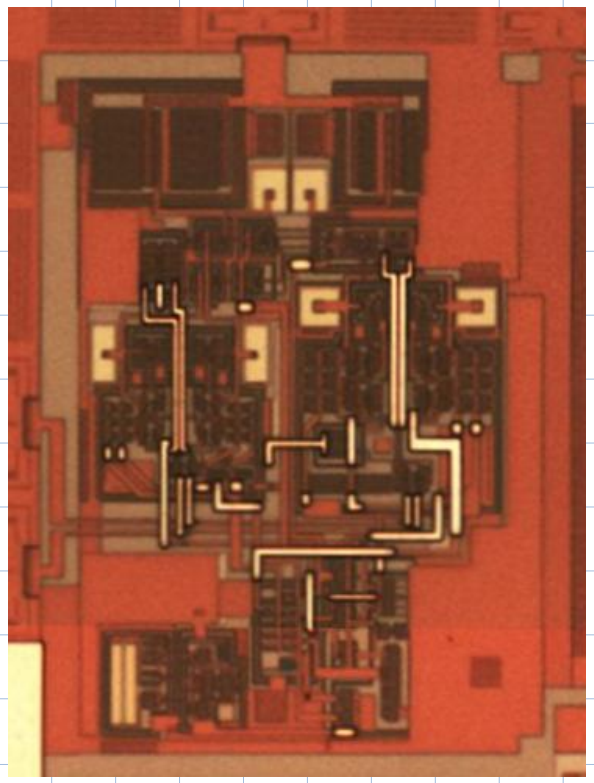


Más ejemplos…

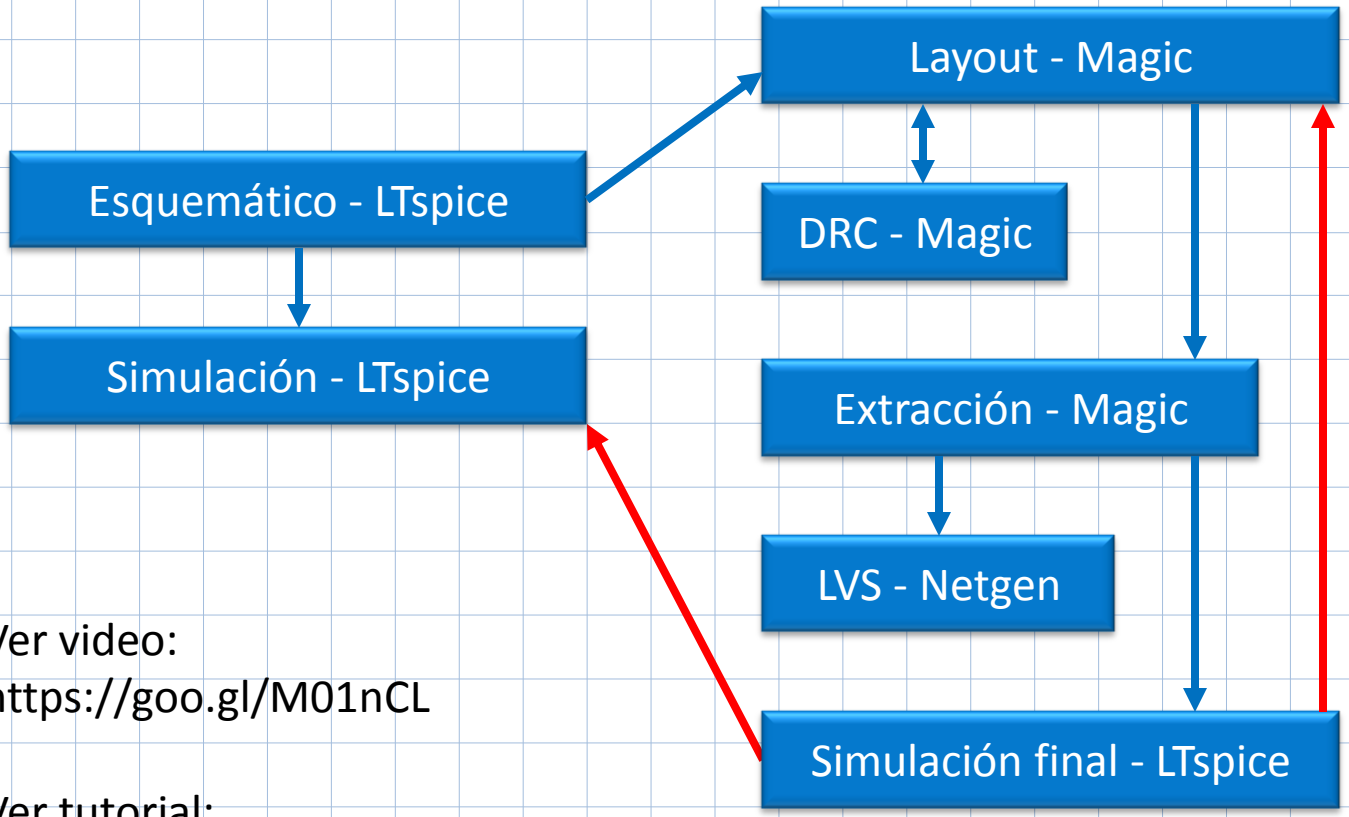
El objetivo de IEE3423 es llevar un circuito integrado analógico, de señales mixtas o digital, a un diseño a nivel layout; enviarlo a fabricación y luego probarlo







Nuestro flujo de diseño analógico para docencia



Ver video:
https://goo.gl/M01nCL

Ver tutorial:
https://goo.gl/UV8Hqe

Continuemos con el área de investigación… ¿**en** microelectrónica o **con** microelectrónica?

En microelectrónica

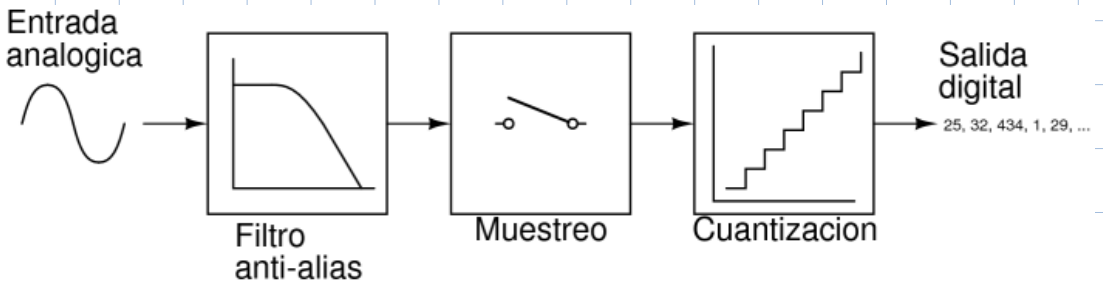
- Se busca diseño de circuitos de alto desempeño
- Journals y conferencias
  - ISSCC
  - VLSI
  - ISCAS
  - JSSC
  - TCAS
- Resultados son función del nodo tecnológico
- Gran costo de entrada
- Ayuda mucho tener diseños y "ecosistema" adecuado

Con microelectrónica

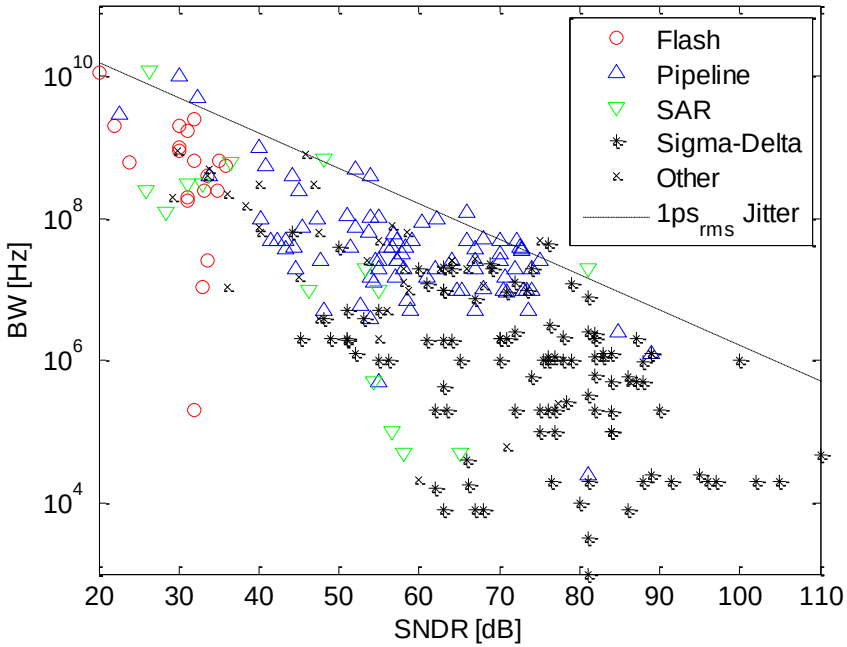
- Se busca resultado científico posibilitado gracias a ASICs
- Journals y conferencias
  - Múltiples opciones
  - Dependen del tema central
    - Ej: Ing. biomédica
    - Instr. astronómica
    - Física de partículas
- Resultados son menos sensibles al nodo tecnológico
- Costo de entrada es razonable
- Factible de desarrollar sin tener tradición en diseño electrónico

Ejemplo: investigación en conversores A/D

Conversión A/D

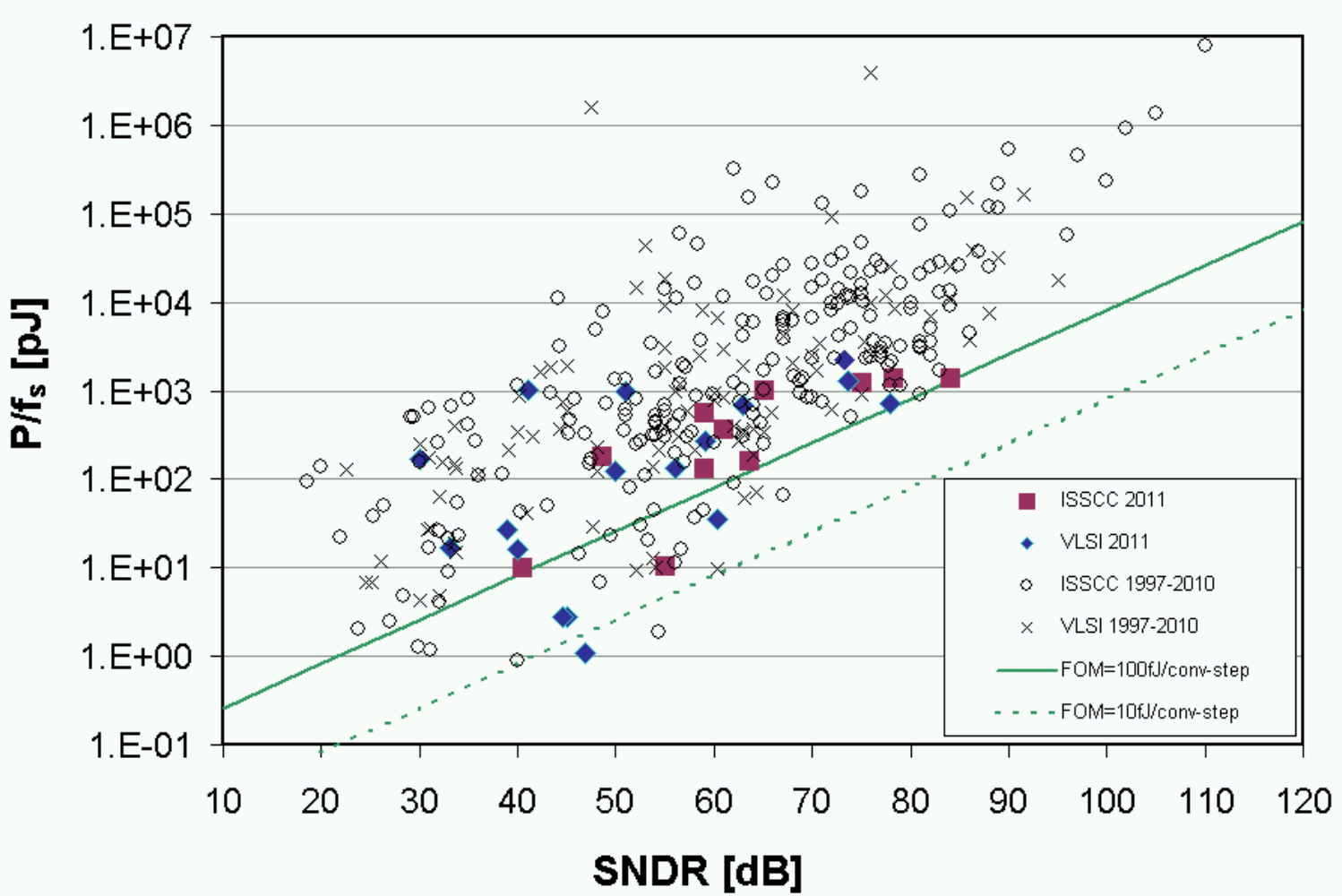


- Diferentes algoritmos de conversión
- Diferentes cifras de desempeño:
  - Consumo de potencia
  - Resolución
  - Frecuencia de muestreo
  - Linealidad estática
  - Cifras de desempeño espectrales
  - Etc.



B. Murmann, "ADC Performance Survey 1997-2016," [Online]. Available: http://web.stanford.edu/~murmann/adcsurvey.html.

Energía por operación

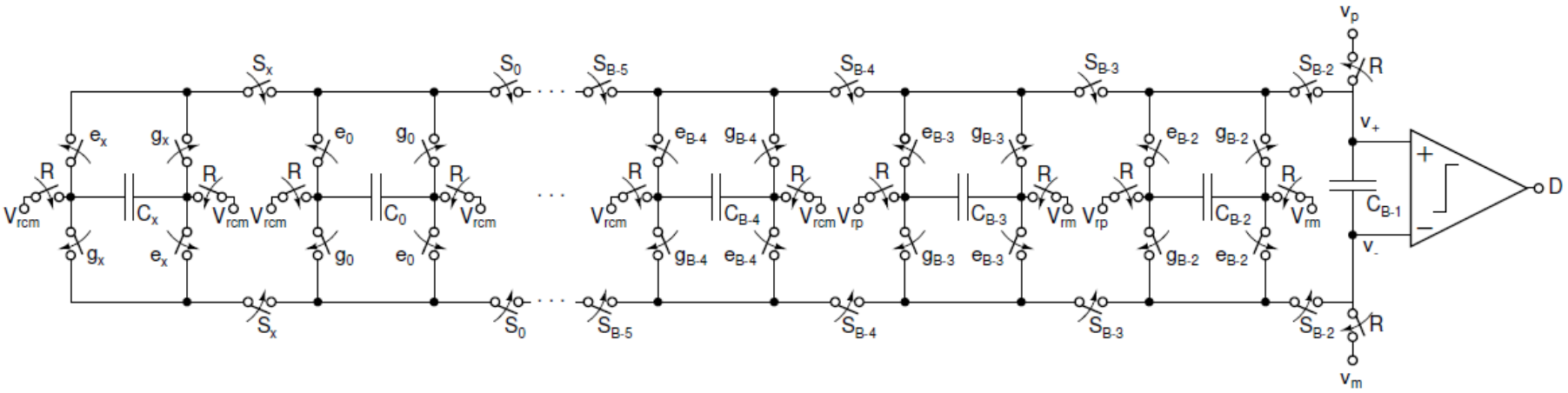


B. Murmann, "ADC Performance Survey 1997-2016," [Online]. Available: http://web.stanford.edu/~murmann/adcsurvey.html.

Un ADC diseñado en Chile…

Implementación de SAR ADC alternativo

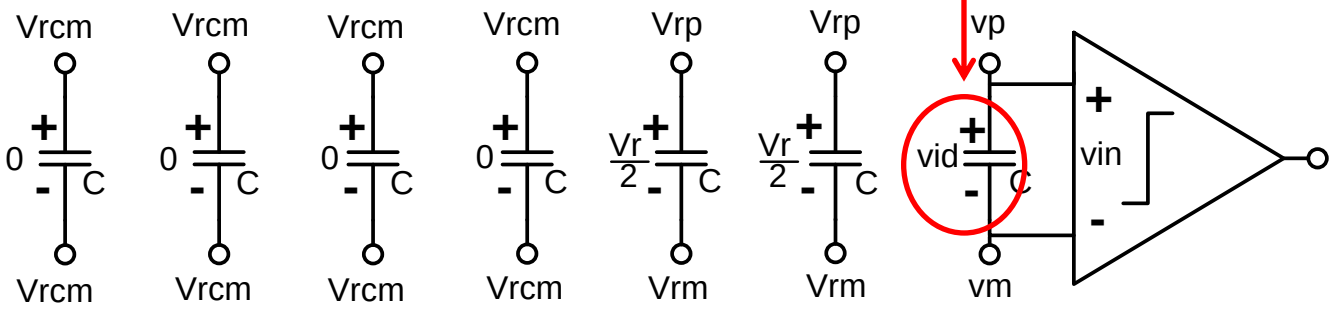
- Basado en idea de Craninckx, ISSCC2007
  - pero incluyendo compartición de referencia
- Resuelve el problema de razón entre cap. máxima y mínima
  - pero es muy sensible a ruido, offset del comparador y emparejamiento
- Es práctico en baja resolución
- Esquemático idealizado a continuación



Funcionamiento (1/7)

Entrada diferencial
-Vr < vid < Vr

Paso 0:

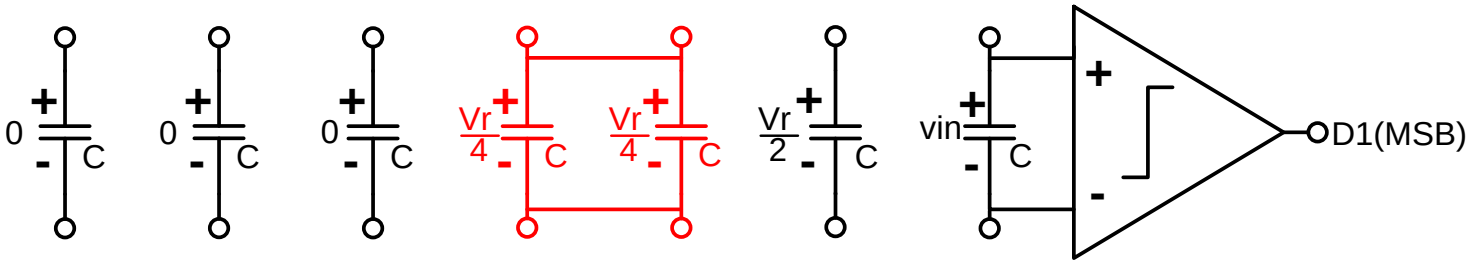


vin(0) = vid

Salida = __ __ __ __ __ __

Funcionamiento (2/7)

Paso 1:

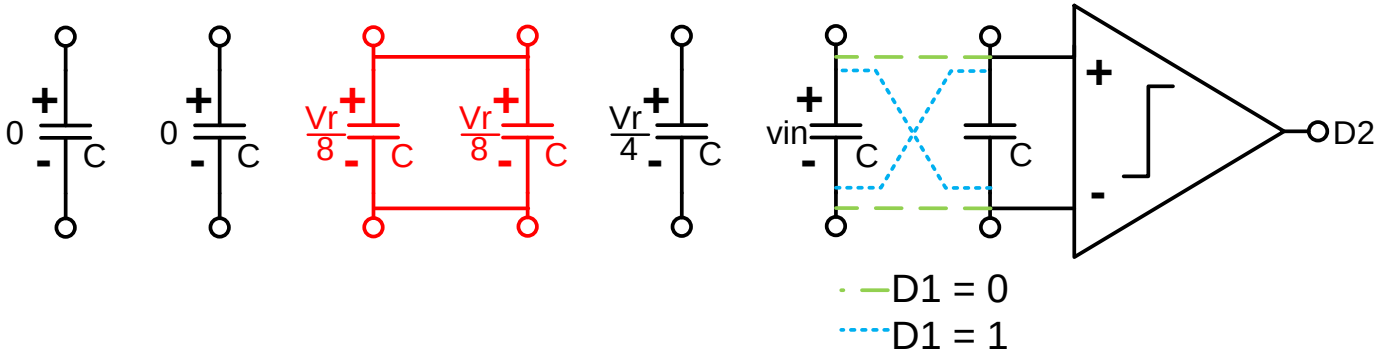


vin(i=1) = vid

Salida = D1 __ __ __ __ __

Funcionamiento (3/7)

Paso 2:

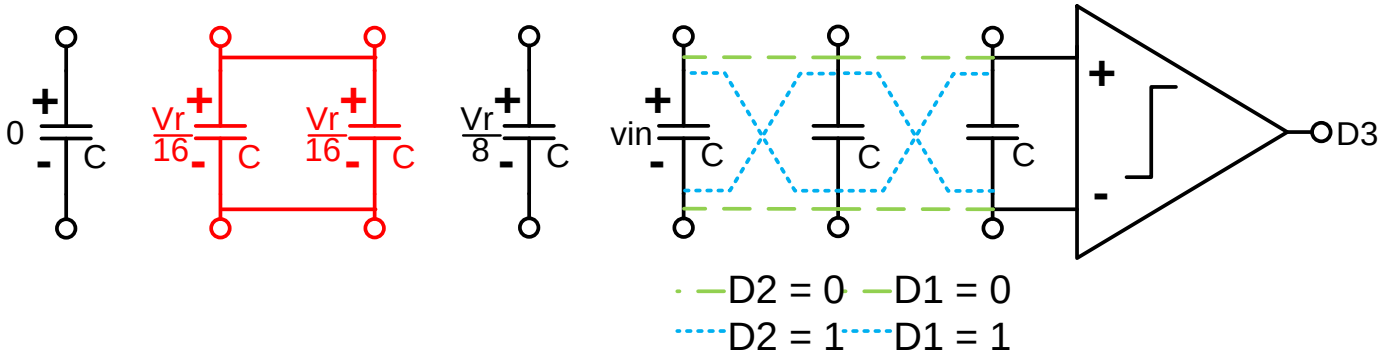


$$vin(i=2) = \frac{1}{2}\left(vid \pm \frac{Vr}{2}\right)$$

Salida = D1 D2 __ __ __ __

Funcionamiento (4/7)

Paso 3:

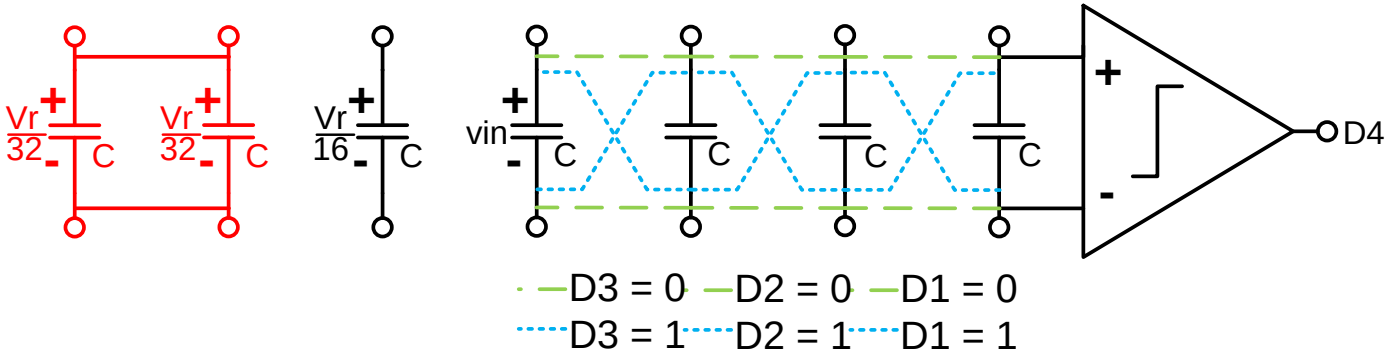


$$vin(i=3) = \frac{1}{3}\left(vid \pm \frac{Vr}{2} \pm \frac{Vr}{4}\right)$$

Salida = D1 D2 D3 __ __ __

Funcionamiento (5/7)

Paso 4:

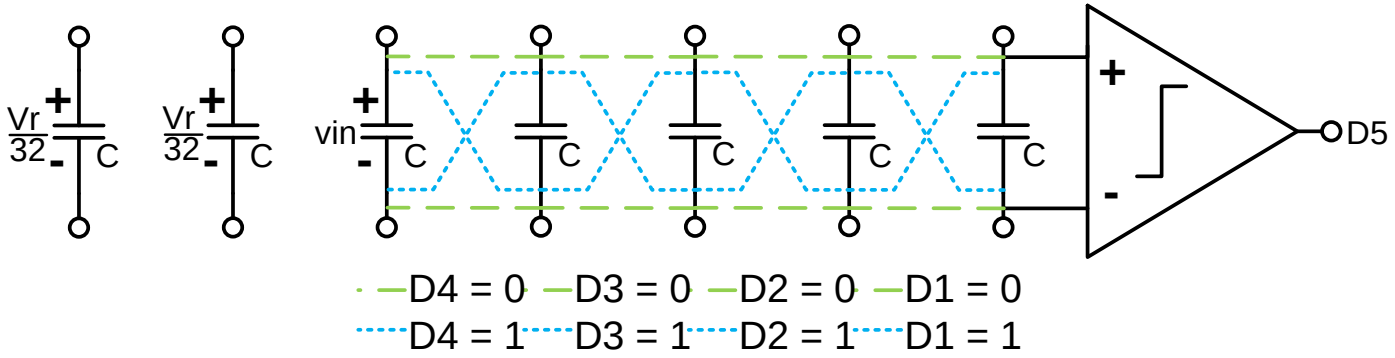


$$vin(i=4) = \frac{1}{4}\left(vid \pm \frac{Vr}{2} \pm \frac{Vr}{4} \pm \frac{Vr}{8}\right)$$

Salida = D1 D2 D3 D4 __ __

Funcionamiento (6/7)

Paso 5:

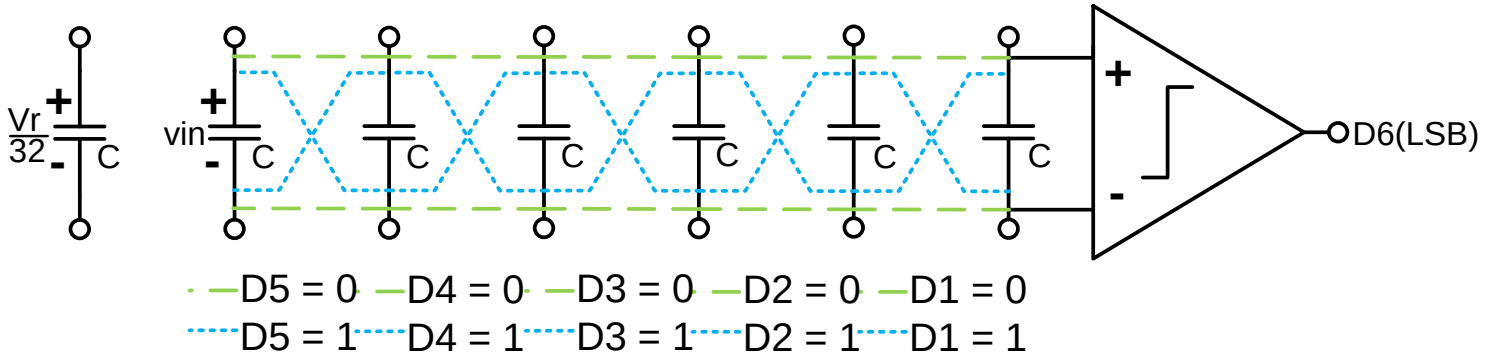


$$vin(i=5) = \frac{1}{5}\left(vid \pm \frac{Vr}{2} \pm \frac{Vr}{4} \pm \frac{Vr}{8} \pm \frac{Vr}{16}\right)$$

Salida = D1 D2 D3 D4 D5 __

Funcionamiento (7/7)

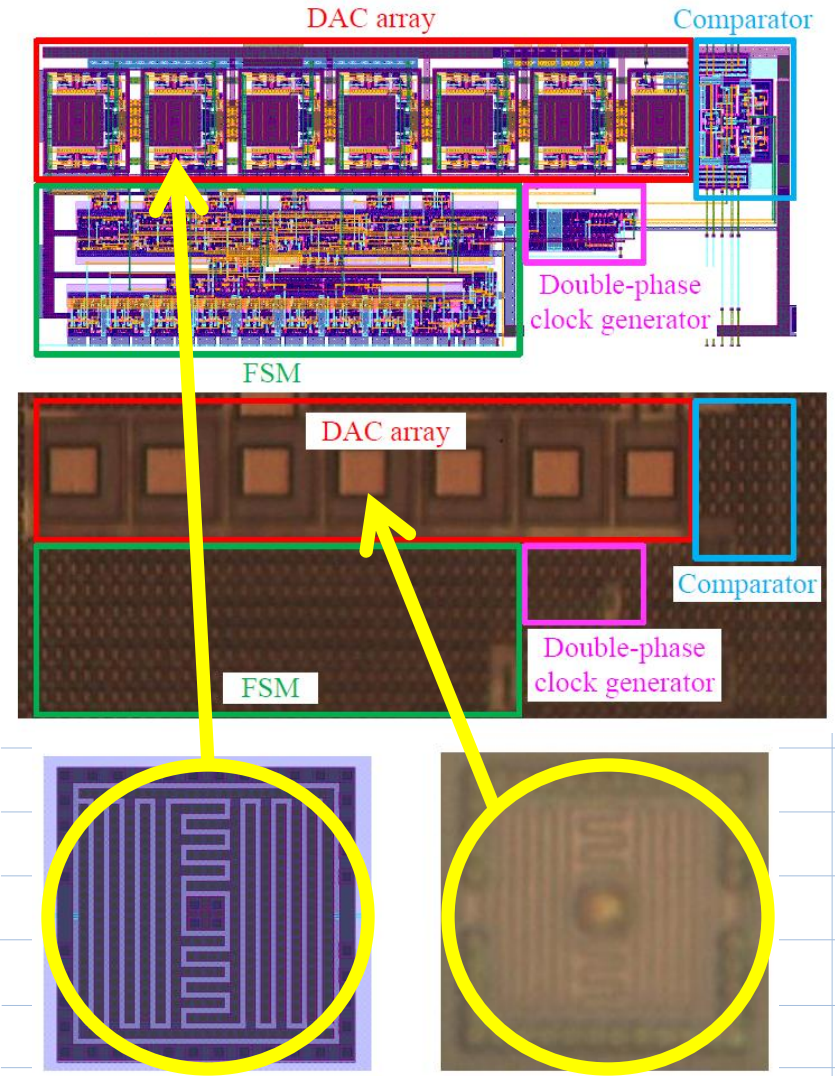
Paso 6:



$$vin(i=6) = \frac{1}{6}\left(vid \pm \frac{Vr}{2} \pm \frac{Vr}{4} \pm \frac{Vr}{8} \pm \frac{Vr}{16} \pm \frac{Vr}{32}\right)$$

Salida = D1 D2 D3 D4 D5 D6

Resultados experimentales – 180nm



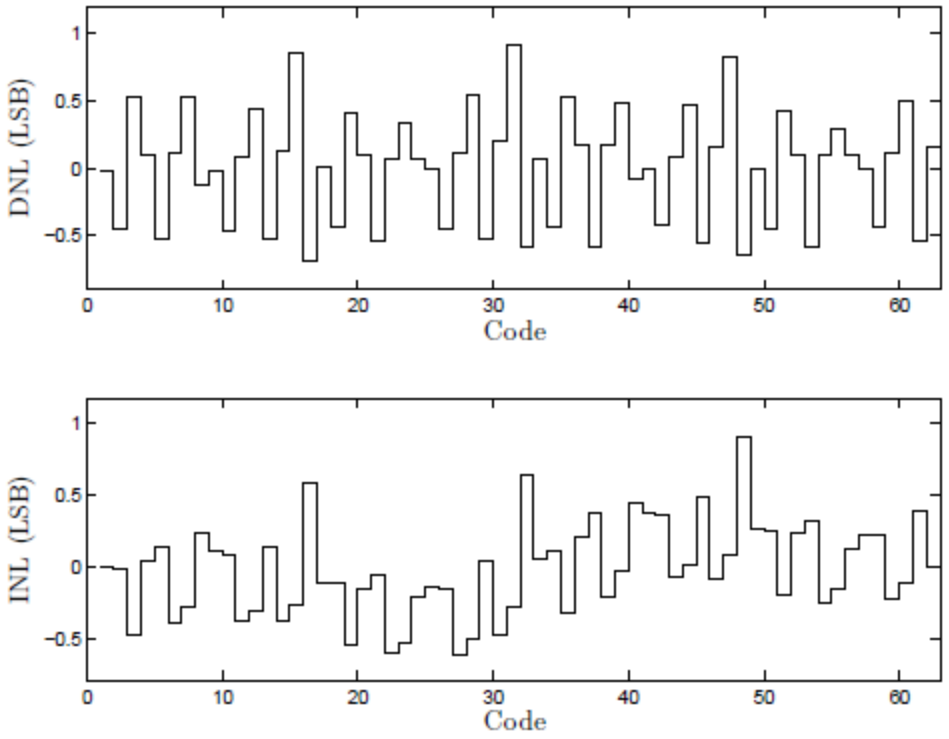


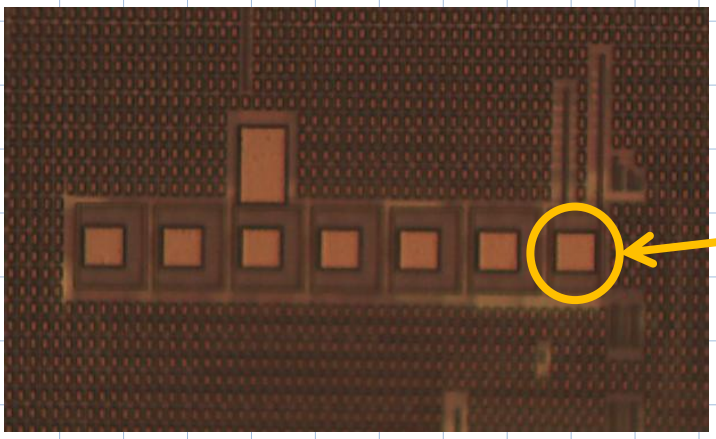
Figure 8: Measured DNL and INL of a the 6-bit PRS ADC implemented in a 180-mm technology. DNL = 0.91181/−0.68948 and INL = 0.89581/−0.61063.

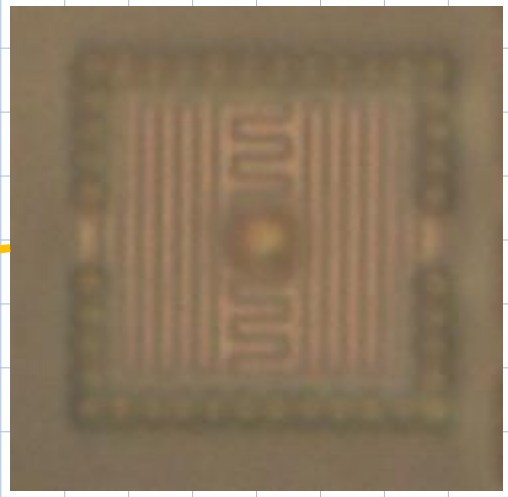
[Alvarez 2015]

Algunas cifras de desempeño

- 180nm CMOS
- Funciona a 12.5 MHz
- 39.5fJ por cada paso de conversión @ 1.8V
- Capacitores de 100fF
- Área total 0.017mm^2

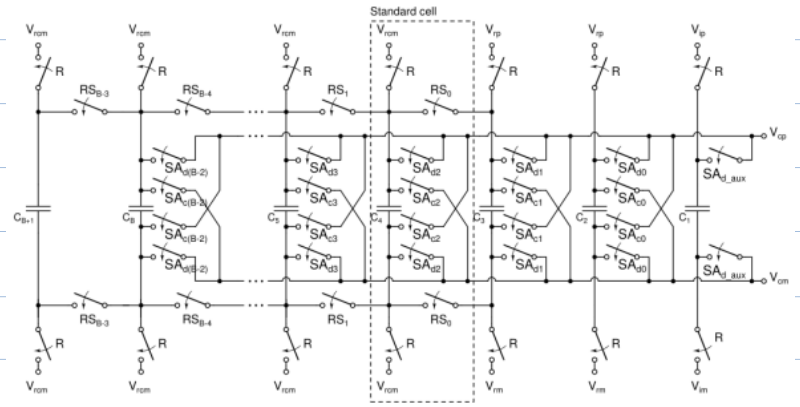
Capacitor MOM

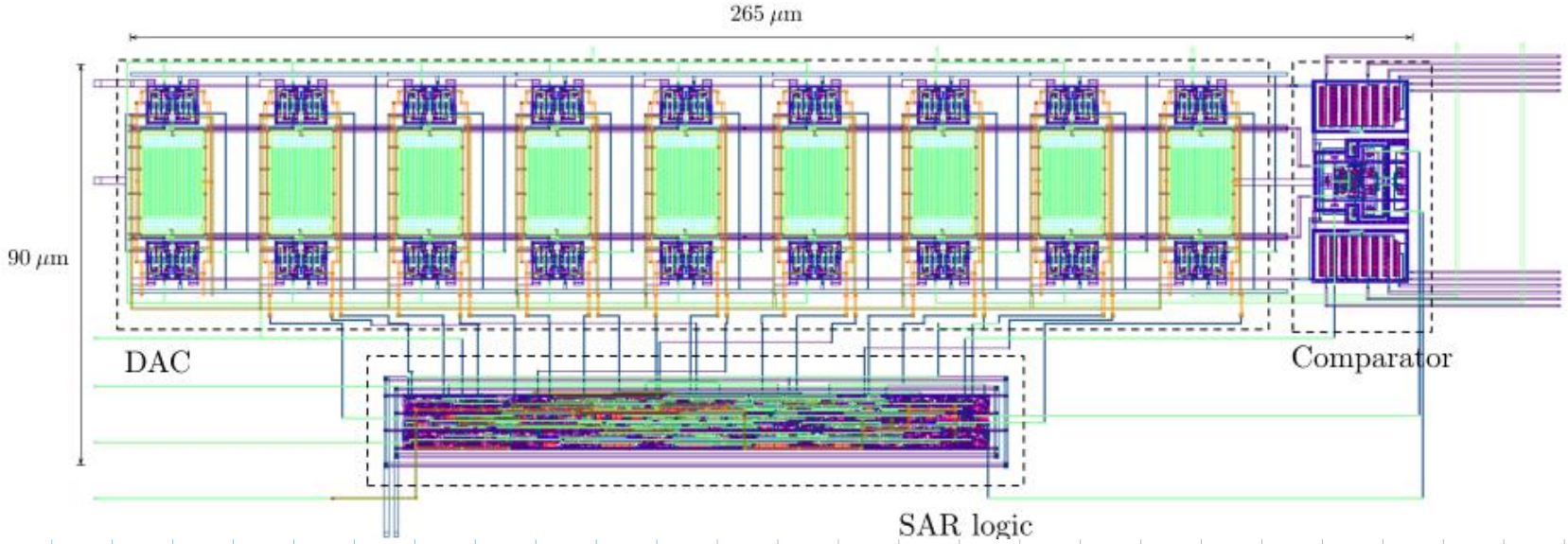




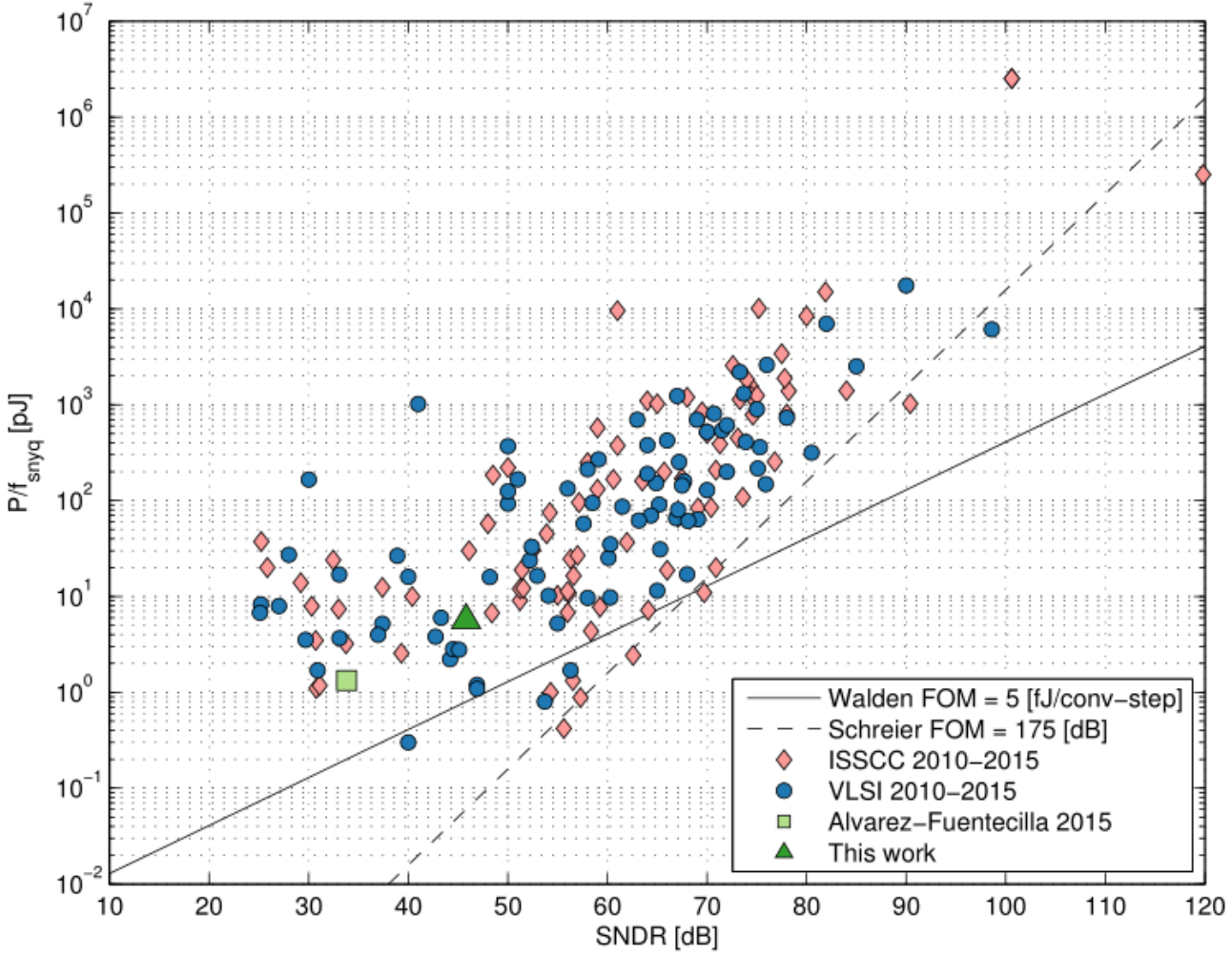
Nuevo diseño en 130nm

- 8 bits
- Nueva topología de conexiones
- Lógica sintetizada



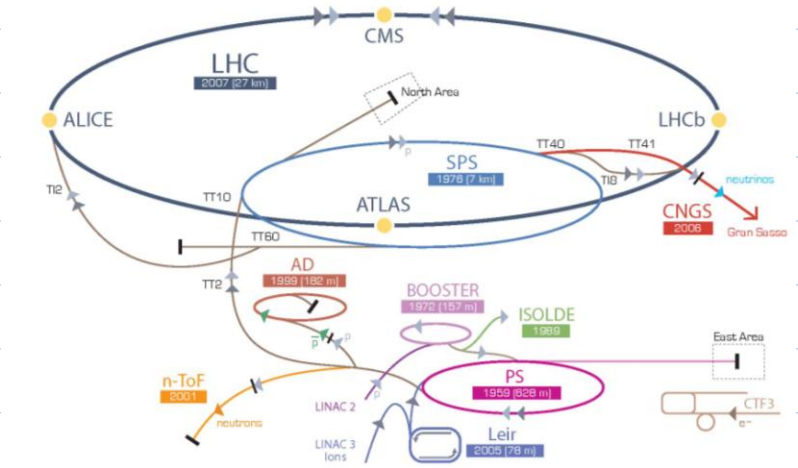


Resultados esperados…

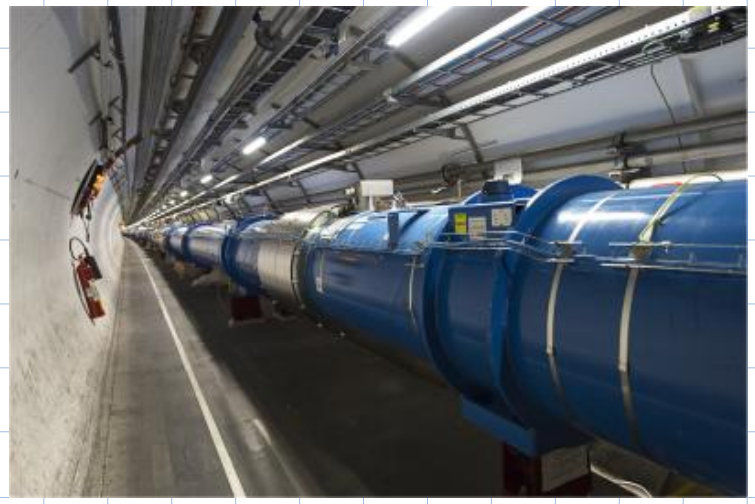


Otro ejemplo de microelectrónica para la investigación: el LHC en CERN

https://goo.gl/80KaIt



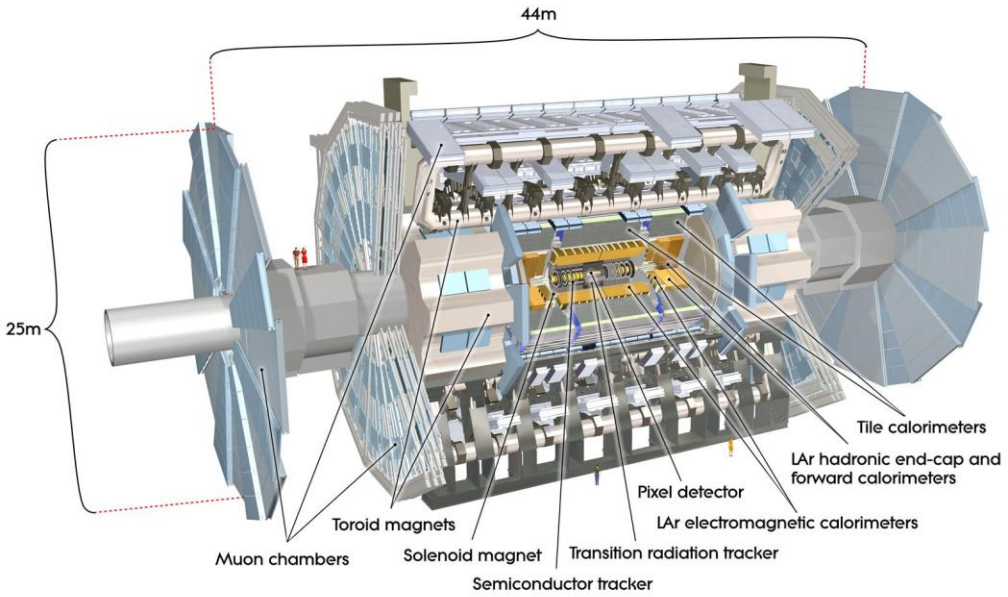
https://goo.gl/uOe7eq



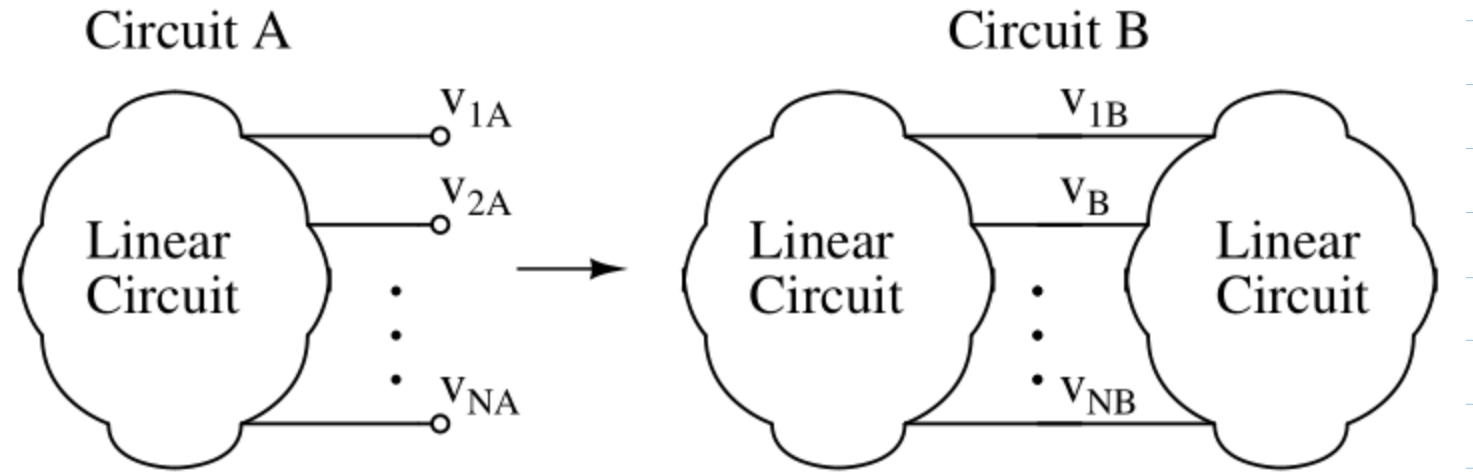
https://goo.gl/baVa60

Lectura de sTGC

- Detector de muones para actualización de ATLAS
- Capacitancia de entrada es función de posición
  - ➢ Electrónica de bajo ruido es subóptima…



Posible solución: front-end reconfigurable



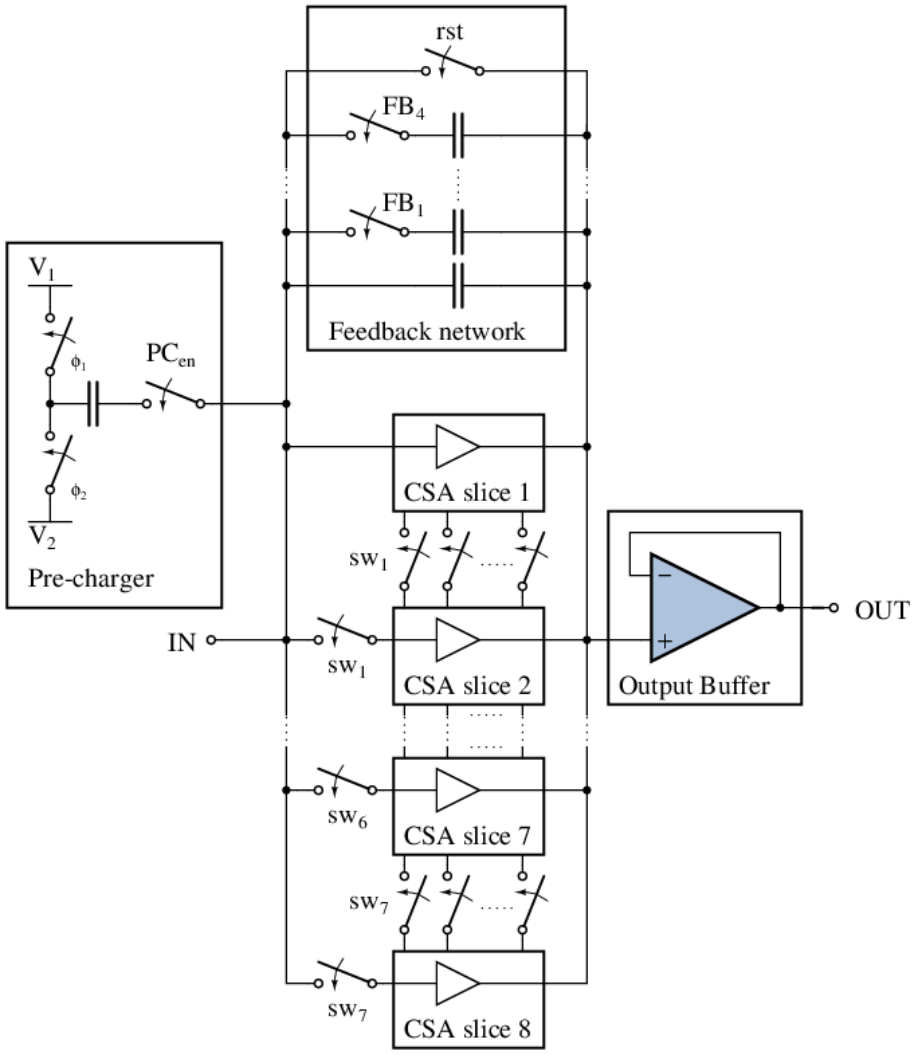
Parámetros que cambian

- Ancho de banda
- Ganancia

Parámetros que no cambian

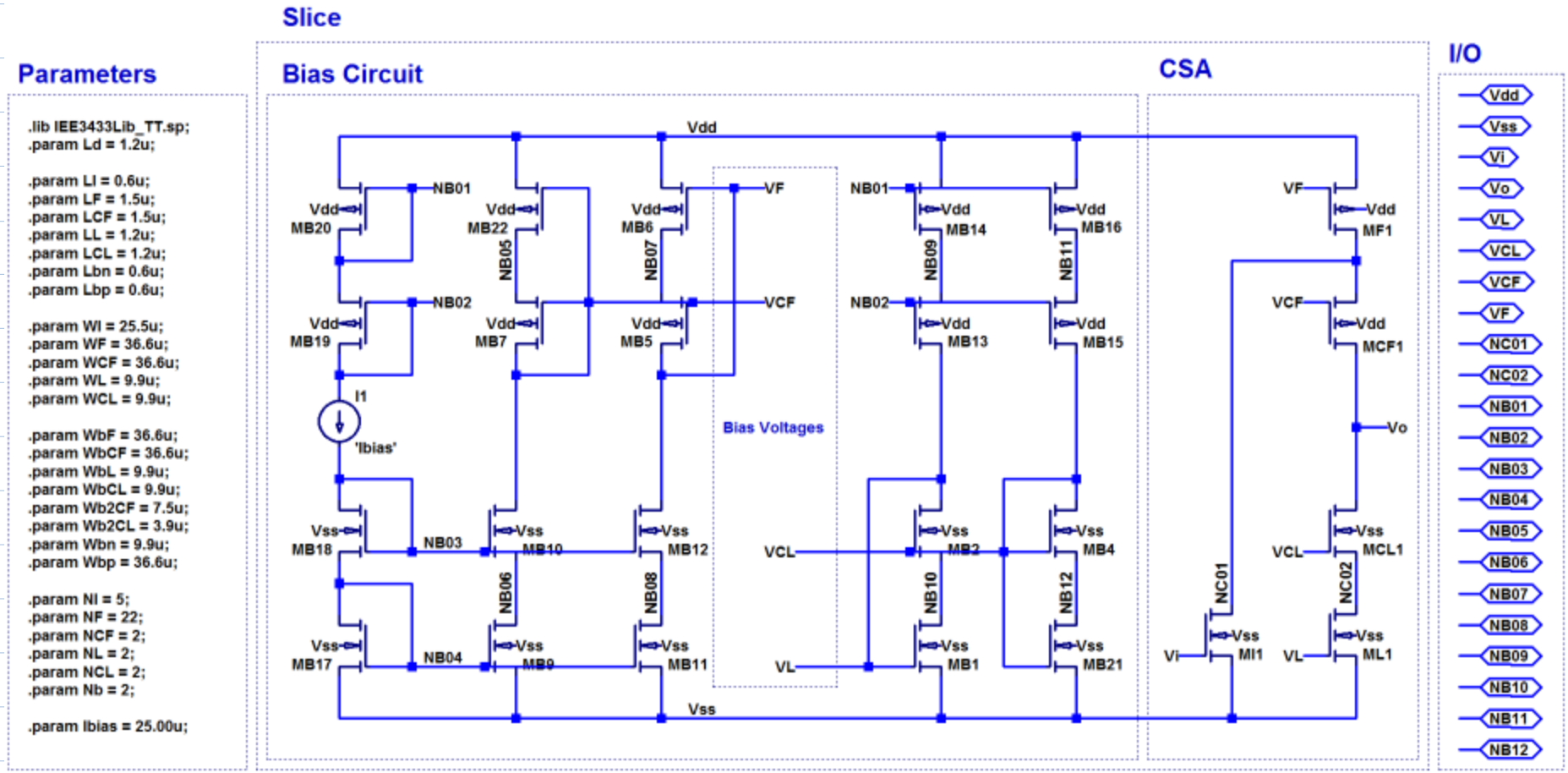
- Manejo de carga
- Ruido
- Disparidad

Concepto del chip



- Amplificador de carga está dividido en franjas
  - Configurable mediante switches
- Capacitancia de realimentación es configurable
- El chip incluye generador de pulsos y buffer

Diseño del front-end



Layout de cada franja

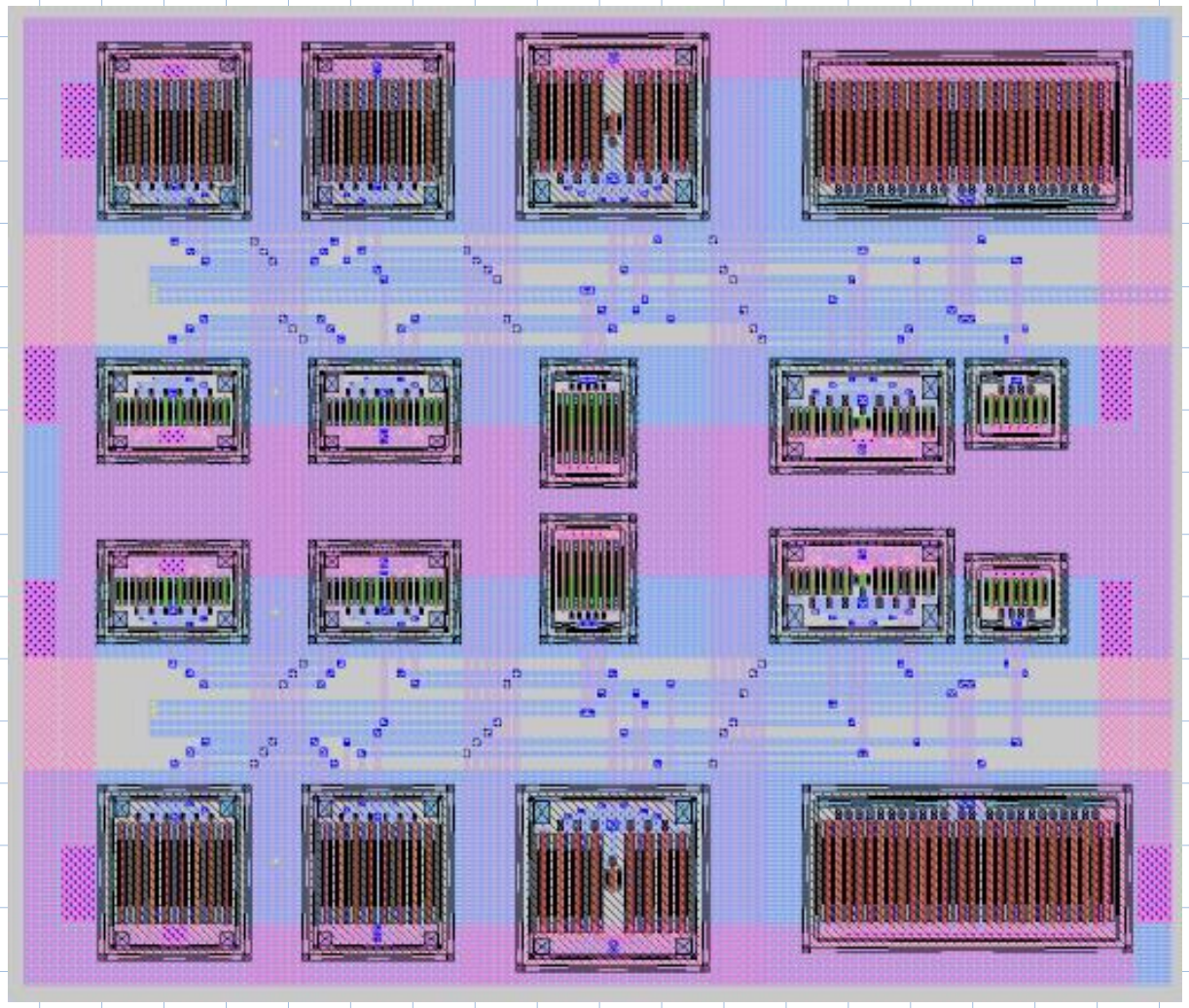
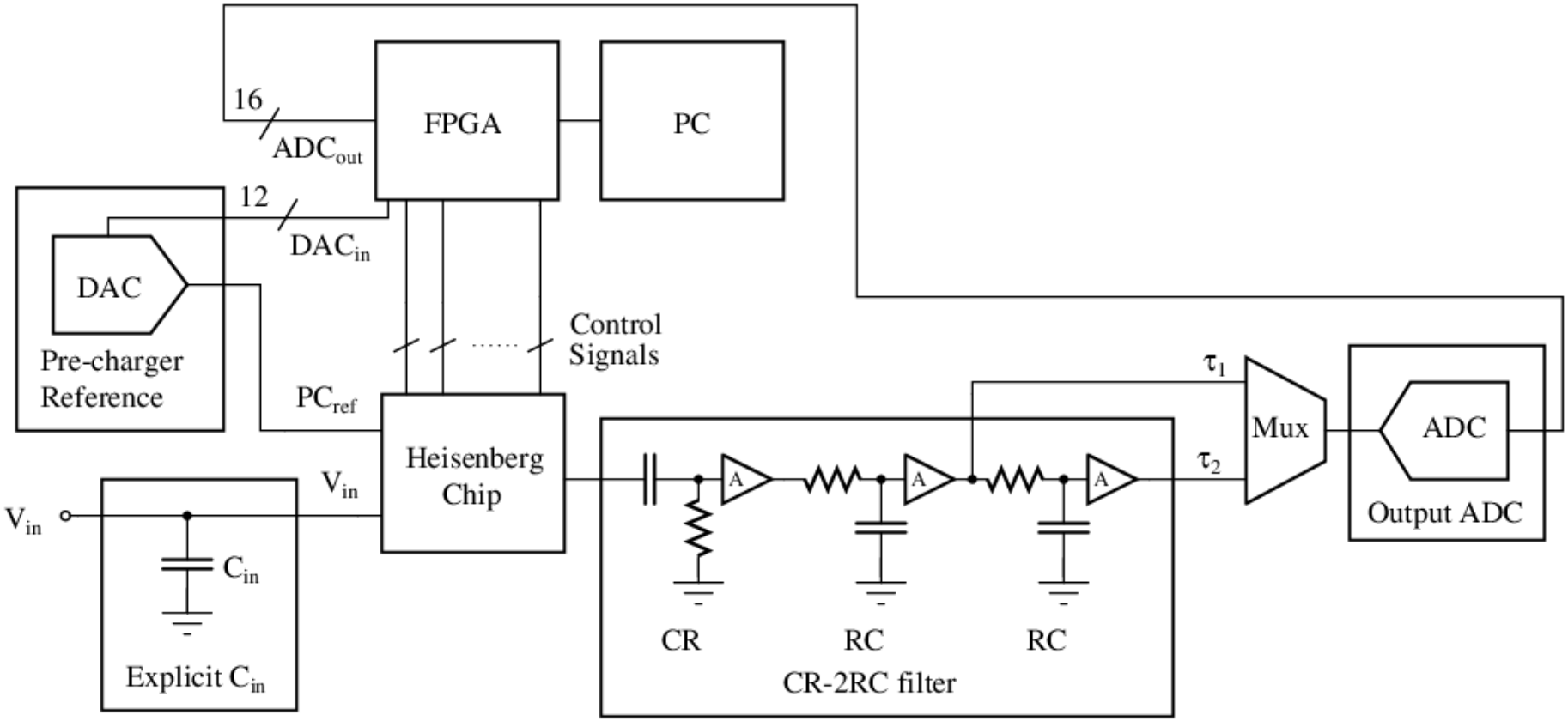


Diagrama de bloques de experimentos



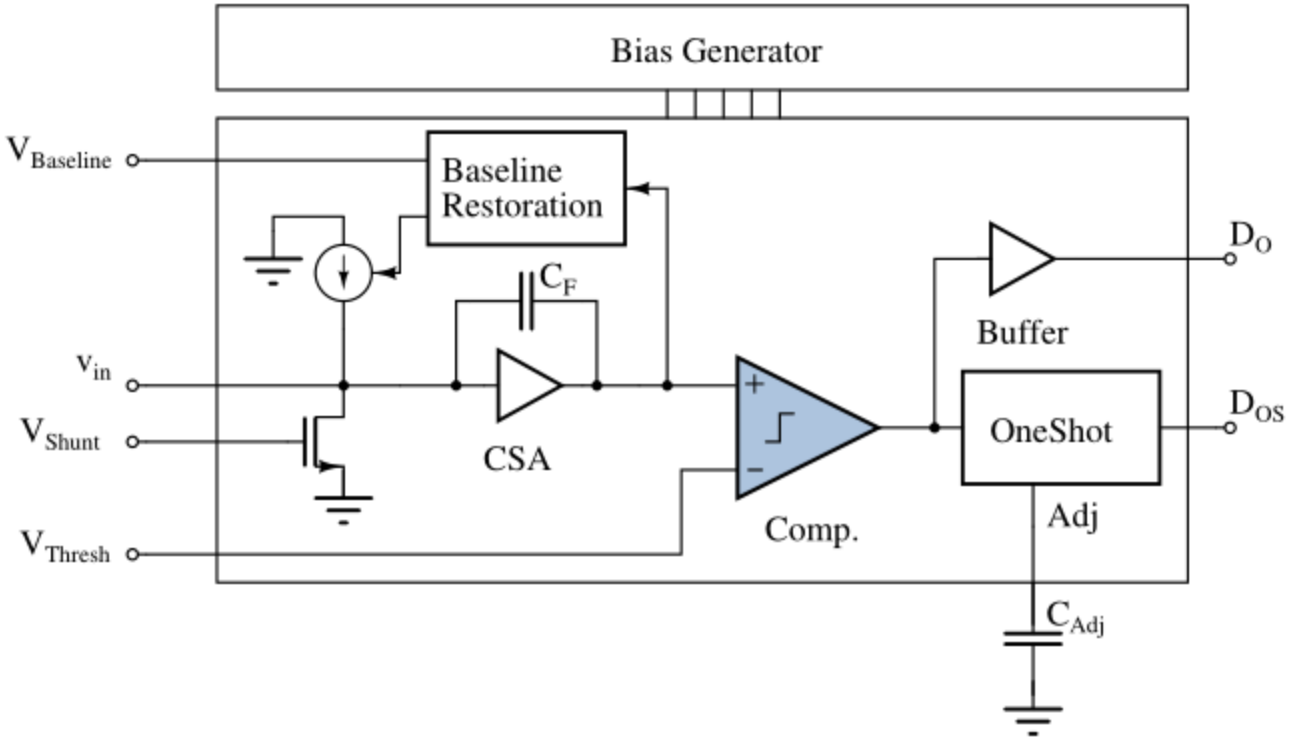
Resultados en camino…

Otro ejemplo: lectura de MPPC

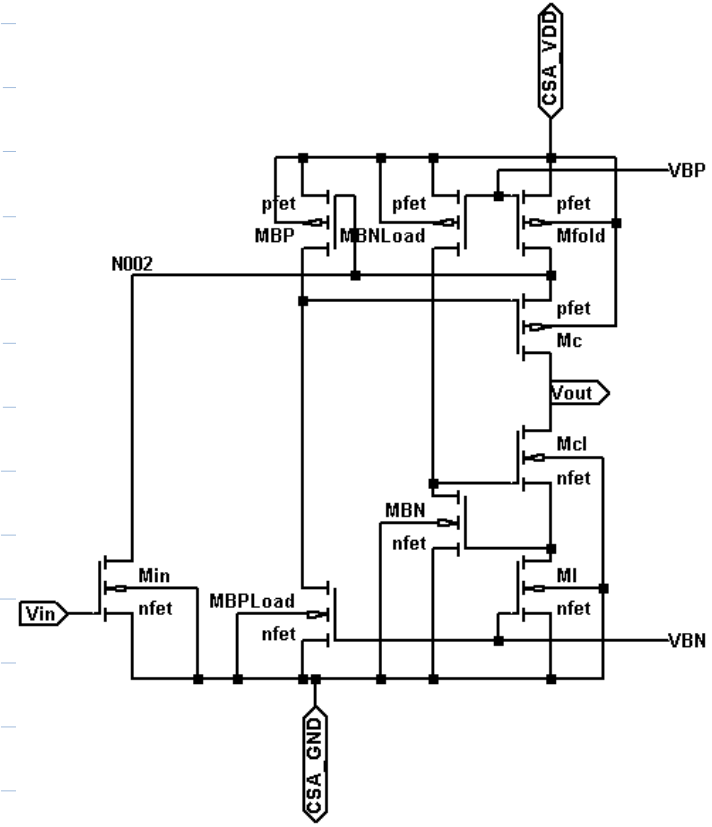
- ¿Qué es un MPPC?

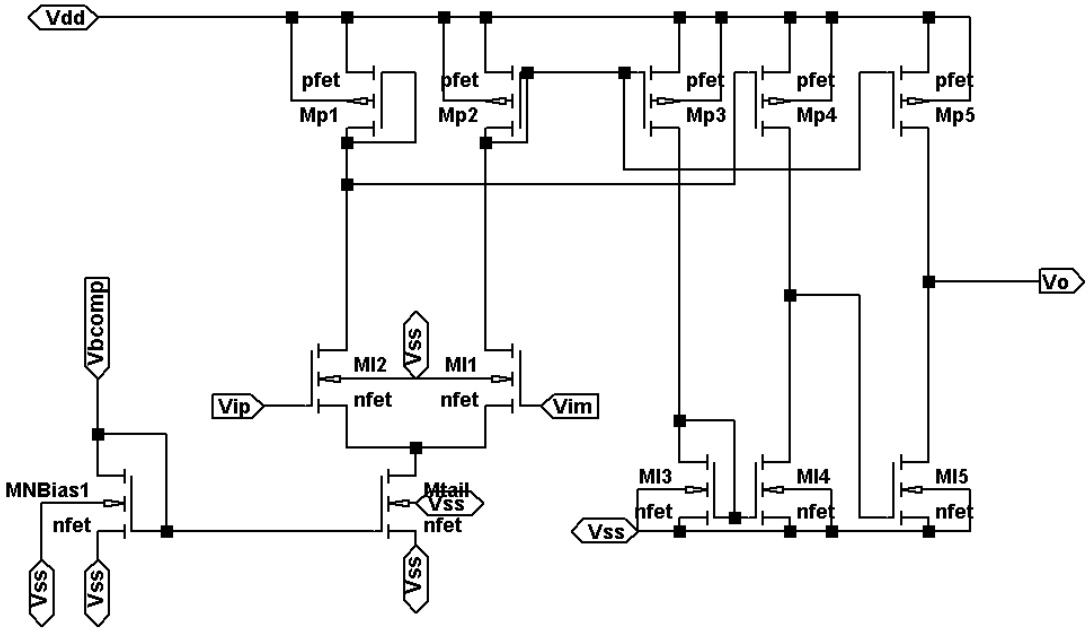
- Desafíos de su lectura

Cutie50: Chip para lectura de MPPC

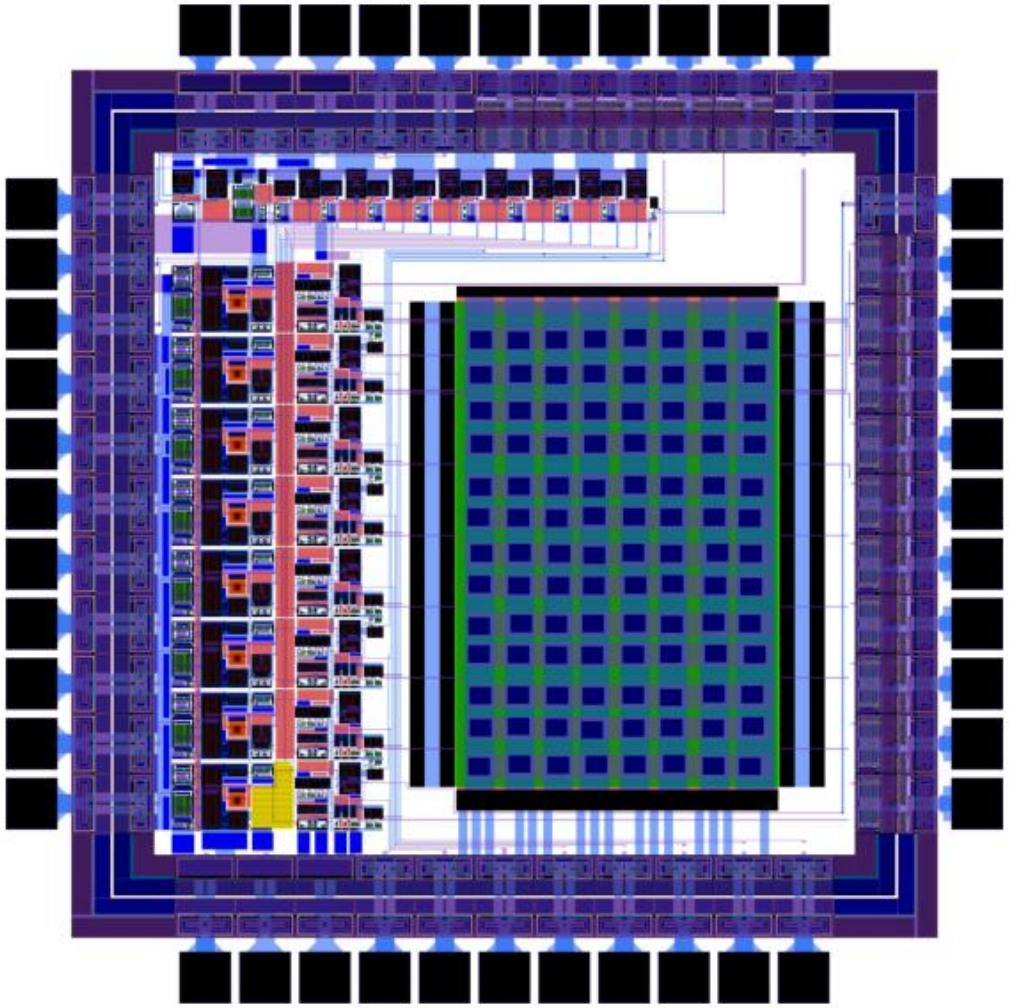


CSA y comparador





Layout de Cutie50



Actualmente siendo fabricado…

Veamos ahora innovación mediante microelectrónica y electrónica avanzada

- Conocimiento en microelectrónica es valioso, no sólo para el diseñador de chips
  - Entendimiento de la tecnología y fenómenos fundamentales
  - Entendimiento de lo que ocurre dentro de un chip
  - Permite sacar mayor provecho a cualquier diseño
  - Numerosas técnicas de diseño a muy bajo nivel
  - Ayuda a entender por qué a veces no funciona…
- Aplicación práctica: Cámaras de ultra bajo ruido

Cámaras de ultra bajo ruido

Idea central: procesamiento del ruido en dominio discreto

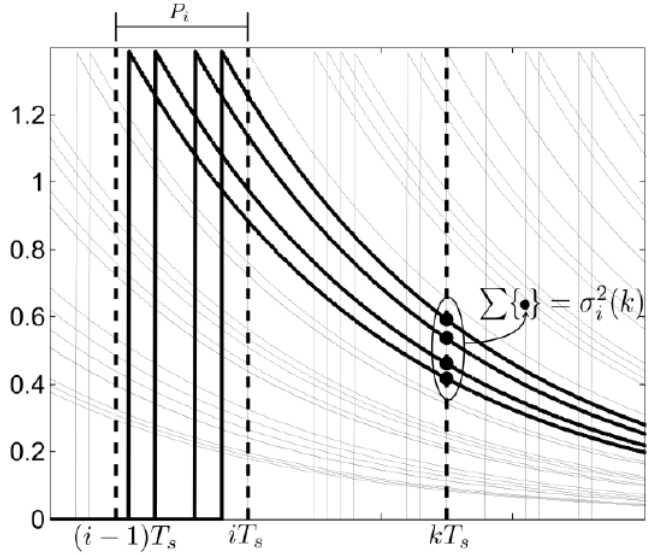


Figure 2-3 Noise contribution of pulses generated within P_i and measured at an arbitrary sample k for an arbitrary filtered noise core function $\hat{y}(t)$. The total contribution is the sum of black dots in quadrature [6].

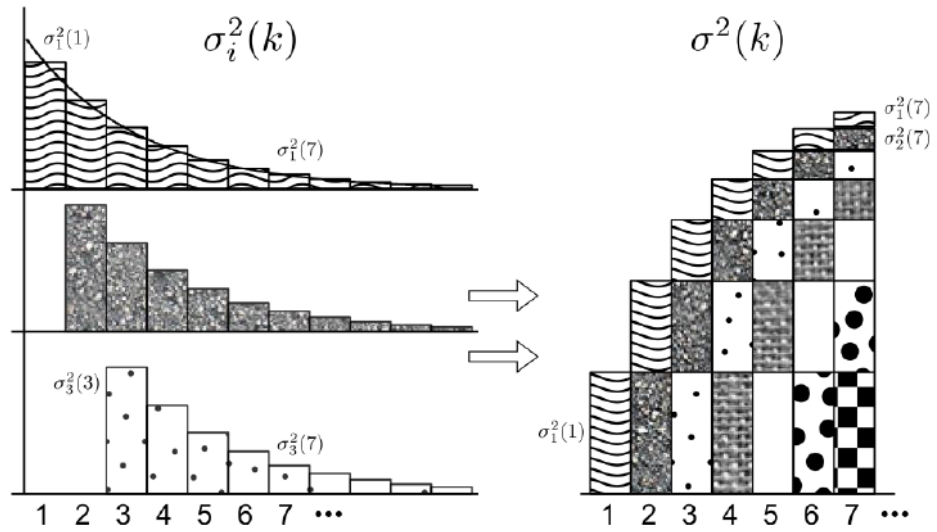


Figure 2-4 Evolution of the total integrated noise at the filter input, where the noise of each sample was split according to (2-3) [6].

[Alessandri 2013]

Filtro óptimo para CCDs

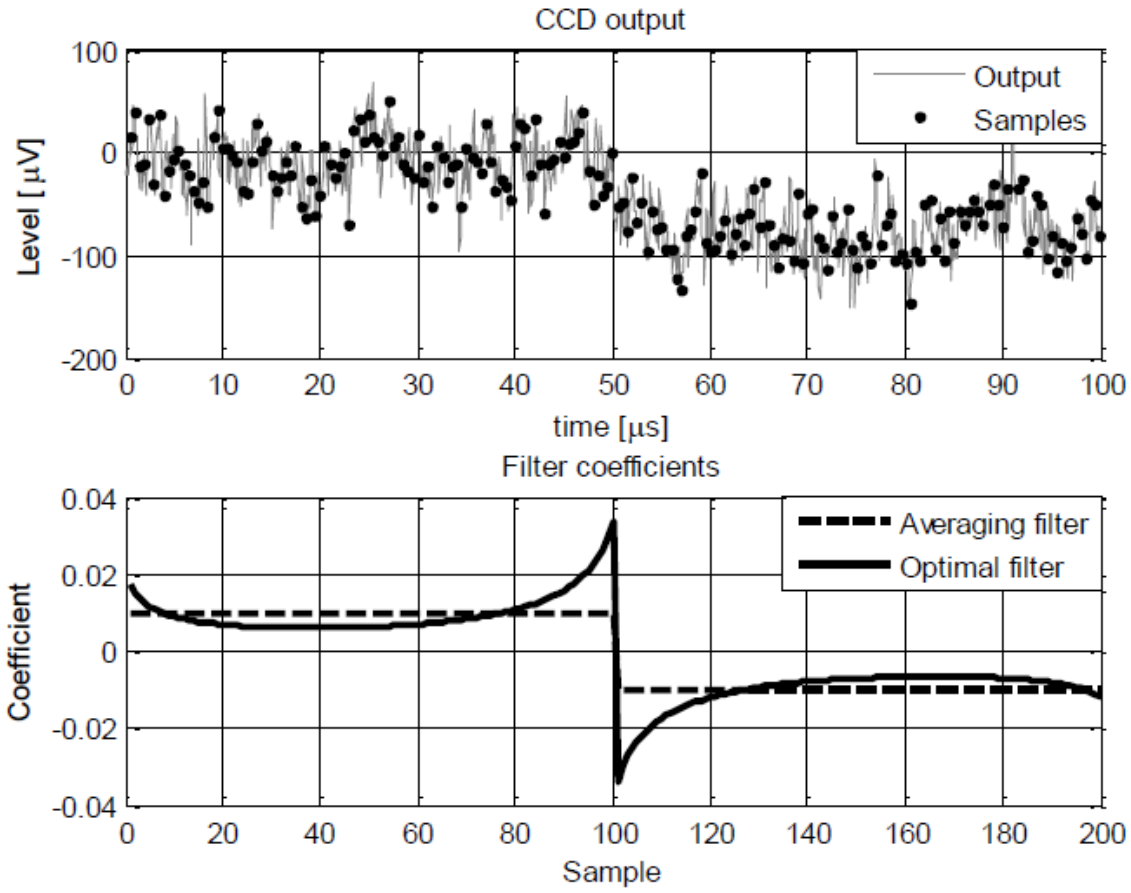


Figure 3-2 Simulated CCD output video waveforms (top) and Optimal weights for CCD231 at 100μs pixel time (bottom).

[Alessandri 2013]

LECCIONES APRENDIDAS

Masa crítica: profesores y alumnos

- La investigación se apoya en alumnos y en sus habilidades aprendidas en cursos
  - Docencia requiere **al menos** de dos profesores dedicados al tema
  - Es muy difícil encontrar alumnos motivados
  - Cuestionamientos entre alumnos respecto de sus opciones de empleabilidad futura

Temas acotados

- La búsqueda de financiamiento obliga a explorar áreas adyacentes, en mi caso:
  - Instrumentación para ing. biomédica
  - Educación en electrónica
  - Cosecha de energía
  - Etc.
- Escasez de alumnos y recursos dificulta avances

Importancia de los fundamentos

- Los arduinos son buenos, pero no olvidemos la implementación a bajo nivel
- Las habilidades de programación son tremendamente útiles, pero la capacidad de hacer electrónica analógica puede marcar una diferencia
- Saber cómo funciona un chip por dentro ayuda a desarrollar mejor electrónica

¿Investigación en microelectrónica?

- Extremadamente difícil comenzar a hacer en investigación en microelectrónica experimental en Chile
  - Inexistencia de diseños previos
  - Alto costo de software y servicios de fabricación
  - Ausencia de red de soporte de la industria
- Pero sí es factible hacer microelectrónica para apoyar la investigación local
  - Costos dependen del desempeño requerido
  - Diseños únicos son publicables

Externalidades: formación de capital humano

- Diseño microelectrónico involucra la creación de un “ecosistema” útil en otras áreas:
  - Software y manejo de licencias
  - Red de proveedores de electrónica
  - Diseño y fabricación de PCBs de alto desempeño
- Habilidades de diseño microelectrónico son útiles en electrónica discreta
- La industria local puede beneficiarse de tales expertos