

# Problematika řešená v podzemních laboratořích

Ivan Štekl

*Ústav technické a experimentální fyziky, ČVUT v Praze*

- 1) **Úvodní poznámky**
- 2) **Podzemní laboratoř LSM (Francie)**
- 3) **Experiment TGV**
- 4) **Experiment NEMO-3**
- 5) **Technologie v oblasti ultra-nízkého radioaktivního pozadí (radon, citlivá HPGe spektroskopie, pixelové detektory)**

## Současný přehled výzkumné činnosti:

### **1) Částicová fyzika a vývoj příslušných detekčních systémů**

- LHC v CERN, experimenty ATLAS, MoEDal, teorie.

### **2) Neutrinová fyzika, fyzika atomového jádra a astrofyzika**

- dvojitý beta rozpad v podzemní laboratoři LSM (Francie),

- detekce dark matter v podzemní laboratoři SNOLAB (Kanada)

- štěpení těžkých jader, struktura hypertěžkých jader, astrofyzikální reakce.

### **3) Detekce vysokoenergetického kosmického záření, detekce gama záření**

- experiment CZELTA (spolupráce se středními školami),

- experiment GROND (spolupráce s MPI, Německo; v Chile),

- projekty sledování radiace a energetických částic ve vesmíru (detektory TPX na ISS NASA, družice Proba-V ESA, projekt RISESAT (Japonsko).

### **4) Aplikovaná experimentální fyzika**

- vývoj pixelových a stripových detektorů, vývoj scintilačních detektorů

- zobrazování pomocí X-záření a neutronů

- biomedicínské aplikace, hadronová terapie

- nedestruktivní testování.

# ÚTEF jako distribuovaná výzkumná infrastruktura v ČR i zahraničí:

## 1) Velké výzkumné infrastruktury

- urychlovač Van de Graaff (výzkumná infrastruktura ČR)
- podzemní laboratoř LSM (Francie, výzkumná infrastruktura ČR).

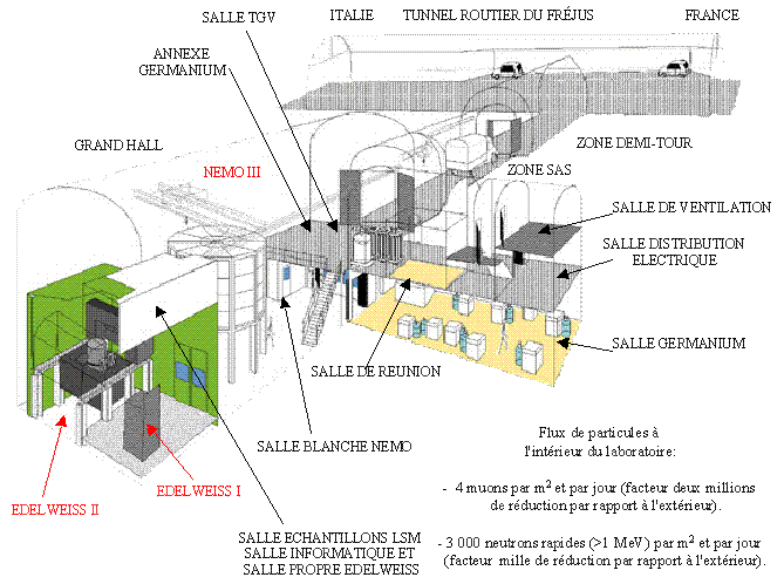
## 2) Laboratoře ÚTEF

- Centrální detektorová a analytická laboratoř ČVUT
- čisté prostory
- RTG a mamograf
- elektronická laboratoř, mechanická dílna
- radonová laboratoř.

## 3) Společná pracoviště v ČR

- laboratoř skenovacího elektronového mikroskopu (ÚTEF + FD)
- laboratoř MARS-CT (ÚTEF + 3. lékařská fakulta UK)
- urychlovač VdG (spolupráce s FJFI)
- laboratoř RTG (ÚTEF + ÚTAM)
- radonová laboratoř (ÚTEF + SÚRO)
- testovací laboratoř pro scintilační detektory (ÚTEF + ENVINET a.s.).

# LSM (Francie)



Tunnel Fréjus (Francie-Itálie):

**Dohoda JOULE (CNRS, CEA-SÚJV-RFBR-ČR-SR)**

1760 m skály, 4800 mwe

Potlačení toku  $\mu$  -  $0.5 \times 10^{-6}$

Potlačení neutronů ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) -  $10^{-3}$

Hlavní hala -  $30 \times 10 \times 11 \text{ m}^3$  ( $70 \text{ m}^2, 18 \text{ m}^2, 21 \text{ m}^2$ ).

## 16 Ge nízkopozad'ových detektorů

Testy konstrukčních materiálů pro experimenty geologie, archaeologie, biologie, bezpečnost...

Testy elektroniky,....

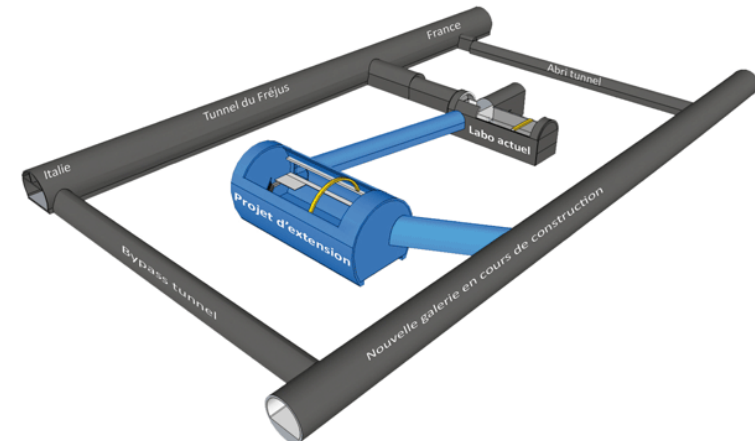
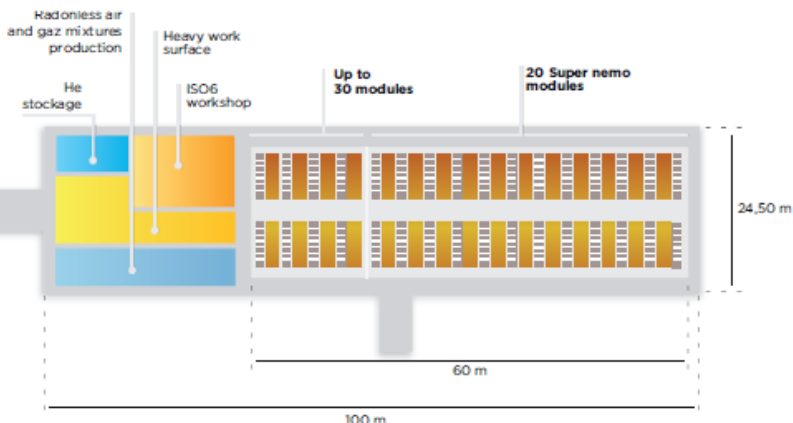
**$\beta\beta$  rozpad - NEMO-3, SuperNEMO, TGV, SPT, OBELIX**

**DM – EDELWEISS, SEDINE, MIMAC**

## Rozšíření LSM:

Plán rozšíření o  $11000 \text{ m}^3$

SuperNEMO, EURECA, TGV, HPGe spectroscopy,...



# Neutrinová problematika řešená v ÚTEF ČVUT:

## 1) $2\nu\beta\beta$ a $0\nu\beta\beta$ rozpad

- experiment NEMO-3 (ukončen), SuperNEMO (ve výstavbě), COBRA (R&D CdTe pixelových detektorů)

## 2) $2\nu\text{EC}/\text{EC}$ rozpad

- experiment TGV (běžící), SPT (R&D Si pixelových detektorů)

## 3) Vzbuzené stavy $2\nu\beta\beta$ rozpadu

- HPGe detektor OBELIX (běžící)

## 4) Vývoj teorie

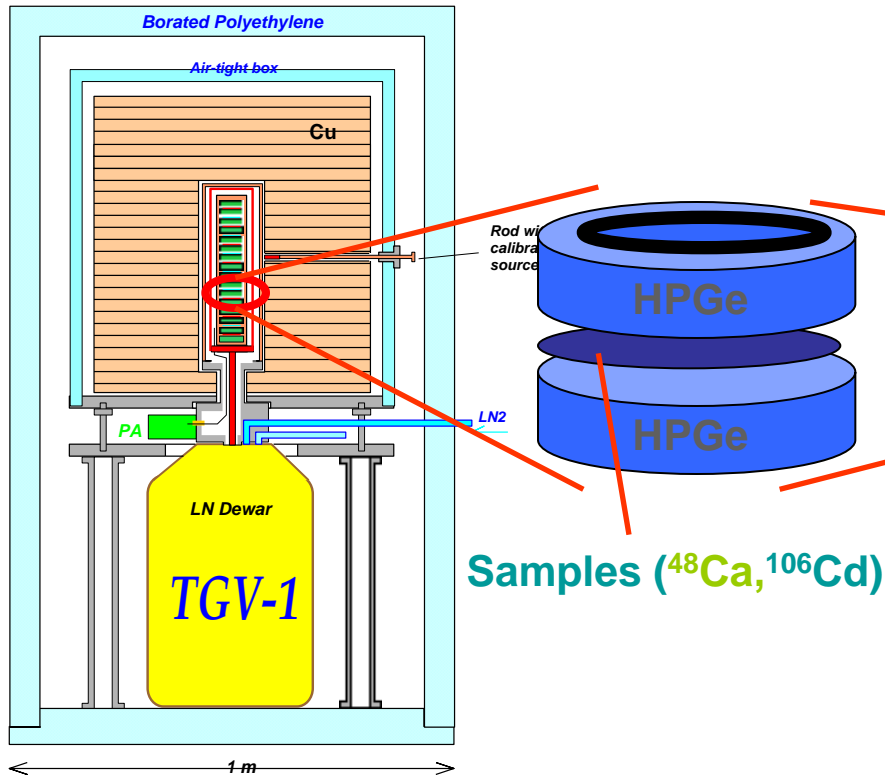
- Jaderné maticové elementy

## 5) Detekce reaktorových antineutrin

- na bázi spolupráce s SÚJV Dubna, detektor  $S^3$  (ve výstavbě)

# EXPERIMENT TGV (IEAP CTU, JINR, CSNSM, CU, RRC)

**TGV I (1996-2000) NIM A372 (1996) 222**

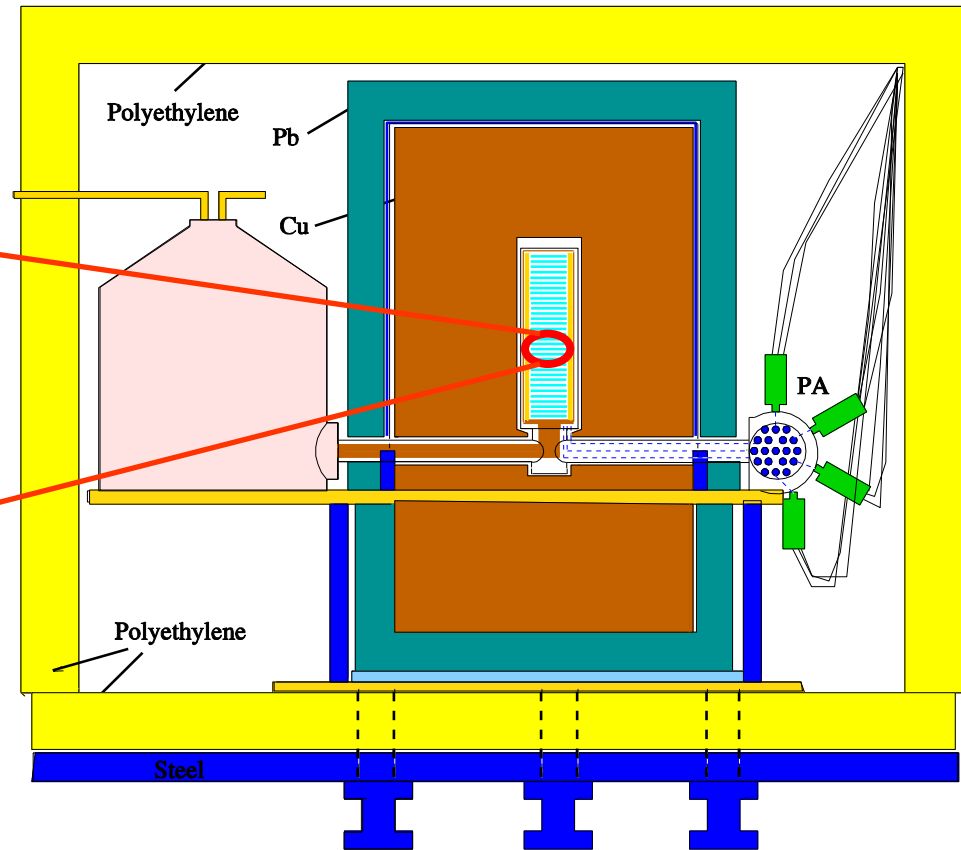


8 samples of enriched  $^{48}\text{Ca}$ :  
 1.08 g  $\approx 1.35 \cdot 10^{22}$  atoms  
 16 HPGe detectors 1200 mm<sup>2</sup> x 6 mm

$$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} (^{48}\text{Ca}) = (4.2^{+3.3}_{-1.3}) \times 10^{19} \text{ yr}$$

**Phys. Lett. B495 (2000) 63**

**TGV II (2004-2010) NIM A569 (2006) 737**



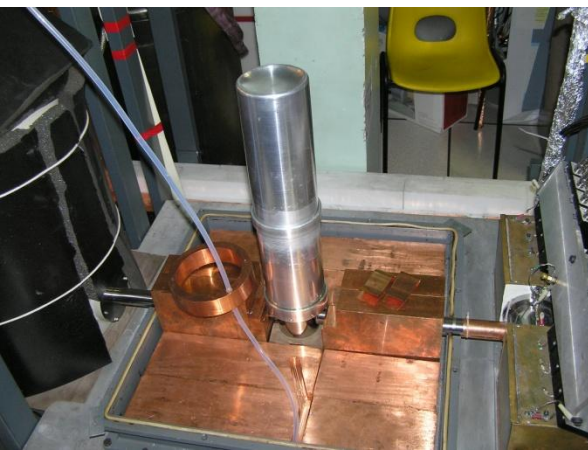
16 samples of  $^{106}\text{Cd}$  (enrich.75%)  
 13.6 g  $\sim 5.79 \times 10^{22}$  atoms of  $^{106}\text{Cd}$   
 32 HPGe detectors 2040 mm<sup>2</sup> x 6 mm

$$T_{1/2}^{2\nu\text{E}CEC} (^{106}\text{Cd}) > 4.2 \times 10^{20} \text{ yr (90\% CL)}$$

**Nucl. Phys. A 852 (2011) 187-206**

## Současný stav a plány do budoucna:

1. TGV pokračuje s 23 gramy vysoce obohaceného  $^{106}\text{Cd}$  (2 $\nu$ EC/EC)
2. Provádění studií (MC, teorie, pozadí) –
  - a) možnost měření 2 $\nu$ EC/EC rozpadu s jinými izotopy ( $^{162}\text{Er}$ ,  $^{156}\text{Dy}$ ) [V.Ceron, J.Hirsch, arXiv:nucl-th/9911021v1](#)
  - b) možnost měření 0 $\nu$ EC/EC rozpadu ( $^{152}\text{Gd}$  g.s.,  $^{112}\text{Sn}$  exc. state – resonanční zesílení procesu 0 $\nu$ EC/EC pro  $Q - Q_r < 1$  keV)  
[Z.Sujkowski, S.Wycech, Phys. Rev. C70, 052501, 2004](#)  
[J.Bernabeu, A. deRujula, C.Jarlskog, Nucl. Phys. B223, 15 \(1983\)](#)  
signature – X-rays  $< 100$  keV +  $\gamma$  or  $e^-e^+$  nebo Majoron  
výhoda: poměr mezi 0 $\nu$ EC/EC a 2 $\nu$ EC/EC rozpadů
3. Pixelové detektory (Si) v EC/EC rozpadu – 1 mm, koincidenční měření, pozice detekce, energie X-fotonů)



# Experiment NEMO-3

(France, UK, Czech Republic, Russia, Spain, USA, Japan, Ukraine, Finland, Slovakia )

Izotop	$T_{1/2}^{\beta\beta 2\nu}$
$^{100}\text{Mo}$	$[7.16 \pm 0.01 \text{ (stat)} \pm 0.54 \text{ (sys)}] 10^{18} \text{ y}$
$^{82}\text{Se}$	$[9.6 \pm 0.1 \text{ (stat)} \pm 1.0 \text{ (sys)}] 10^{19} \text{ y}$
$^{116}\text{Cd}$	$[2.88 \pm 0.04 \text{ (stat)} \pm 0.16 \text{ (sys)}] 10^{19} \text{ y}$
$^{130}\text{Te}$	$[7.0 \pm 0.9 \text{ (stat)} \pm 0.9 \text{ (sys)}] 10^{20} \text{ y}$
$^{150}\text{Nd}$	$[9.11 + 0.25 - 0.22 \text{ (stat)} \pm 0.63 \text{ (sys)}] 10^{18} \text{ y}$
$^{96}\text{Zr}$	$[2.36 \pm 0.21] 10^{19} \text{ y}$
$^{48}\text{Ca}$	$[4.4 + 0.5 - 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (sys)}] 10^{19} \text{ y}$

700 000  $2\nu\beta\beta$  events  $^{100}\text{Mo}$

**Signal/Backgr. ratio: 76**

start of operation: 2003

end of operation: January 2011

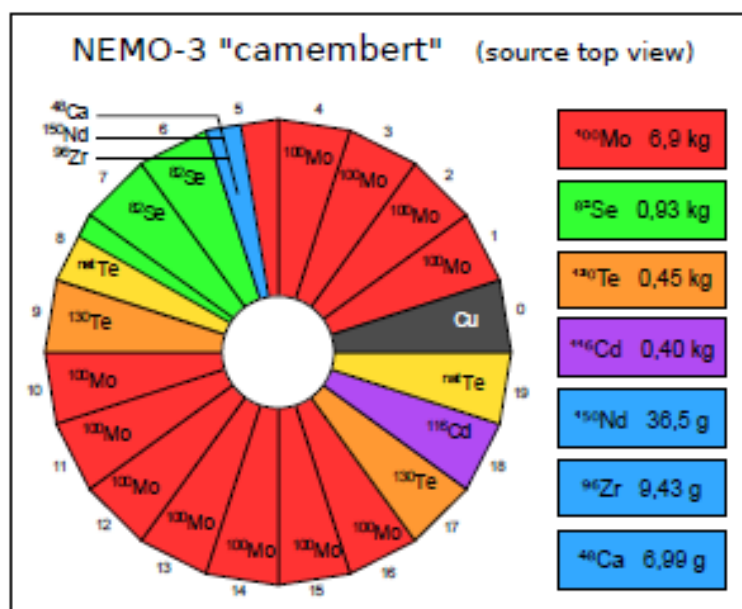
$^{100}\text{Mo}$   $T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 1.0 \cdot 10^{24} \text{ y}$

$\langle m_\nu \rangle < 0.3 - 0.9 \text{ eV}$

[Phys. Rev. D. 89.111101 (2014)]



z ČR: ÚTEF  
ČVUT, MFF UK





A(<sup>222</sup>Rn) in LSM ~ 10-15 Bq/m<sup>3</sup>

May 2004 : detector NEMO-3 in tent

A(<sup>222</sup>Rn) ~ Bq/m<sup>3</sup>

Antiradon setup: starts running Oct. 2004

2x500 kg charcoal @ -50°C, 7 bars

**Activity: A(<sup>222</sup>Rn) < 10 mBq/m<sup>3</sup> !!!**

**Flux: 150 m<sup>3</sup>/h**

**(produced by ATEKO company, Czech rep.)**

## Free-Radon Air factory



# Approaches to double beta studies

GERDA	SuperNEMO	CUORE	COBRA	TGV II
Detector = source	Tracking + scintillator	Low-temp. detector	Semiconductor + segmentation	Setup based on semiconductor detectors

## Pixel R&D projects

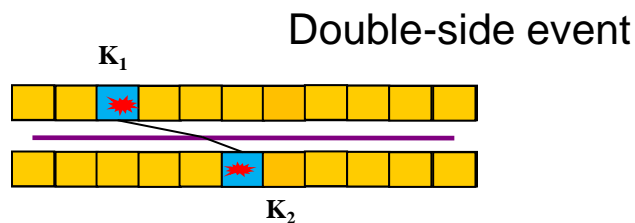
### COBRA extension

- Segmented CdTe pixel detectors (enriched Cd)
- Signature = two tracks of electrons from one pixel, Bragg curve
- Particle identification / rejection (alpha, electrons, photons)

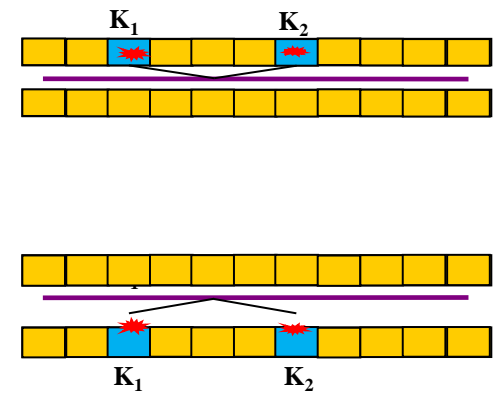
### SPT (EC/EC)

- Si pixel detectors in coincidence mode
- Thin foil of enriched isotope
- Signature = two hit pixels with X-rays of precise energy
- Efficiency (factor 2x comparing with TGV II)
- Particle identification (alpha, electrons)

Observable:  $2 \times 21\text{keV}$  X-rays from  $^{106}\text{Pd}$  daughter originated in the enriched Cd foil



Single-side events



# Shrnutí:

- 1) Naměřen poločas rozpadu procesu  $2\nu\beta\beta$   $^{48}\text{Ca}$  (TGV, NEMO-3)
- 2) Posunutí limitu poločasu rozpadu  $2\nu\text{EC}/\text{EC}$   $^{106}\text{Cd}$  (TGV)
- 3) Spoluúčast na měření poločasu rozpadu procesu  $2\nu\beta\beta$  celkem 7 izotopů (NEMO-3)
- 4) Naměřen poločas rozpadu procesu  $2\nu\beta\beta$   $^{100}\text{Mo}$  (vzbuzený stav) (OBELIX, NEMO-3) a  $^{150}\text{Nd}$  (NEMO-3)

Pozn. ( $2\nu\beta\beta$  byl naměřen pro 11 izotopů, vzbuzený stav pro 2 izotopy, přechod  $2\nu\text{EC}/\text{EC}$  pro 2 izotopy)

- 5) Vývoj teorie dvojitého rozpadu beta
- 6) Vývoj potřebných technologií (detektory, velmi nízké pozadí,...)
- 7) Pravidelná mezinárodní konference MEDEX (9.-12.6., již desáté pokračování, [medex15.utef.cvut.cz](http://medex15.utef.cvut.cz), publikováno AIP)
- 8) Pontecorvo letní škola o neutrinové fyzice (SR, ČR, SÚJV; 27.8.-4.9.2015, Horní Smokovec; <http://theor.jinr.ru/~neutrino15/>, org. výbor – V.A.Matveev chair, vice-chairs S.M. Bilenky, F. Šimkovic, I. Štekl, A.G.Olshevskiy).

Děkuji za pozornost

# How it compares with calculations

Table 2

A comparison of measured lower bound for the  $2\nu\text{EC}/\text{EC}$  decay half-life (in years) of  $^{106}\text{Cd}$  for ground state to ground state transition with calculated half-lives of different nuclear structure approaches. QRPA - quasiparticle random phase approximation, RQRPA - renormalized QRPA, SQRPA - selfconsistent QRPA, PHFB - projected Hartre-Fock-Bogoliubov model, SSDH - single state dominance hypothesis, WS - Woods Saxon single particle energies (s.p.e.), AWS - adjusted WS s.p.e., s.b. (l.b) - small (large) basis of single particle states.

Experiment		Phenomenology		Theory			
$T_{1/2}^{2\nu\text{E}CEC}$	Ref.	$T_{1/2}^{2\nu\text{E}CEC}$	Ref.	$T_{1/2}^{2\nu\text{E}CEC}$		Method	Ref.
				$g_A = 1.0$	$g_A = 1.25$		
$> 5.8 \cdot 10^{17}$	(29)	$> 5.3 \cdot 10^{21}$	(30)	$4.2 \cdot 10^{21}$	$1.7 \cdot 10^{21}$	SU(4)	(19)
<b><math>&gt; 4.2 \cdot 10^{20}</math></b>	<b>p.w.</b>	$> 4.4 \cdot 10^{21}$	(11)	$2.5 \cdot 10^{22}$	$9.7 \cdot 10^{21}$	PHFB	(10)
				$2.2 \cdot 10^{21}$	$8.7 \cdot 10^{20}$	QRPA	(12)
				$1.5 \cdot 10^{20}$	$6.1 \cdot 10^{19}$	QRPA	(13)
				$2.3 \cdot 10^{20}$	$9.0 \cdot 10^{19}$	QRPA (WS)	(14)
				$2.6 \cdot 10^{20}$	$1.1 \cdot 10^{20}$	QRPA (AWS)	(14)
				$5.5 \cdot 10^{21}$	$2.3 \cdot 10^{21}$	QRPA (WS)	(16)
				$3.0 \cdot 10^{20}$	$1.2 \cdot 10^{20}$	QRPA (AWS)	(16)
closed				$5.3 \cdot 10^{20}$	$2.1 \cdot 10^{20}$	RQRPA (WS)	(17)
approaching				$5.1 \cdot 10^{20}$	$2.0 \cdot 10^{20}$	RQRPA (AWS)	(17)
				$5.0 \cdot 10^{20}$	$2.0 \cdot 10^{20}$	SQRPA (s.b.)	(18)
				$6.6 \cdot 10^{20}$	$2.6 \cdot 10^{20}$	SQRPA (l.b.)	(18)

# NEMO detector dismantling





# The SuperNEMO experiment

## SuperNEMO design

NEMO3		SuperNEMO
$^{100}\text{Mo}$	isotope	$^{82}\text{Se}$ or $^{48}\text{Ca}$ or $^{150}\text{Nd}$
7kg	isotope mass	100kg
18%	efficiency	30%
$^{208}\text{Tl} : \approx 100\mu\text{Bq/kg}$ $^{214}\text{Bi} : < 300\mu\text{Bq/kg}$ Rn : 5 mBq/m <sup>3</sup>	internal contaminations in the $\beta\beta$ foils Rn in the tracker	$^{208}\text{Tl} : \leq 2\mu\text{Bq/kg}$ $^{214}\text{Bi} : \leq 10\mu\text{Bq/kg}$ Rn : $\leq 0.15$ mBq/m <sup>3</sup>
8% @ 3MeV	calorimeter resolution	4% @ 3MeV
$T_{1/2}^{0\nu} \gtrsim 1 \times 10^{24} \text{yr}$ $\langle m_\nu \rangle < (0.3 - 0.9) \text{eV}$	sensitivity	$T_{1/2}^{0\nu} \gtrsim 1 \times 10^{26} \text{yr}$ $\langle m_\nu \rangle < (0.04 - 0.11) \text{eV}$



## Scientific program in underground laboratories:

- |  |   |
|--|---|
| I. Solar neutrinos                     | VII. Supernovae neutrinos                     |
| II. Double beta decay                  | VIII. Geology                                 |
| III. Dark matter                       | IX. Microbiology                              |
| IV. Decay of proton                    | X. Measurement of low activities of materials |
| V. Atmospheric neutrinos               | XI. Monitoring of environment                 |
| VI. Oscillation of neutrinos (reactor) |   |

## Purpose of underground laboratory:

- to provide a very deep experimental facility to shield detectors from cosmic rays
- to provide very clean and very low background environment ( $\gamma$  rays shielding, neutron shielding, radon free air, selection of clean construction materials...).

## Easy access, by cars

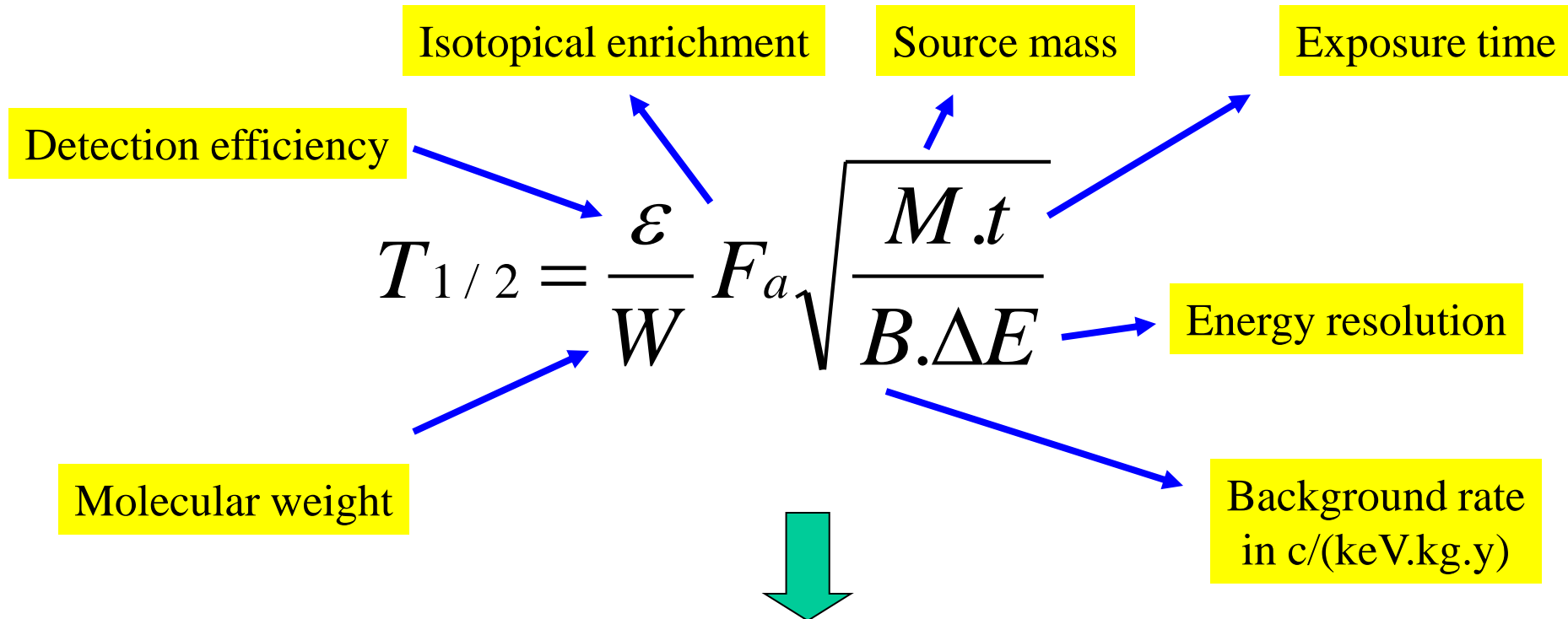
Gran Sasso National Laboratory LNGS (Italy); Baksan (Russia), Laboratorio Subteraneo de Canfranc LSC (Spain), Laboratoire Souterrain Modane LSM (France) – planned extension by factor 20. Andes (future lab – Osvaldo's talk).

## Laboratories in mines

Sudbury National Observatory SNO (Canada), Kamioka (Japan), Boulby (UK)  
Pyhasalmi Laboratory (Finland), Solotvina (Ukraine)

# Why we need underground laboratories?

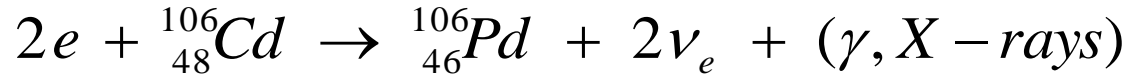
Example: half-life for  $0\nu\beta\beta$ :



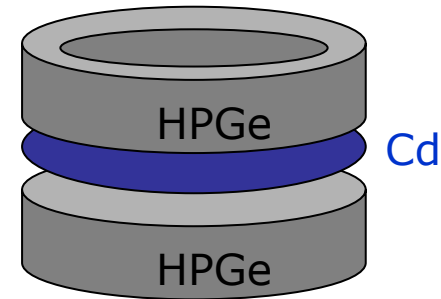
- source = enriched material ( $F_a$ )
- big mass of the source ( $M$ )
- long time of measurement ( $t$ )
- “best” energetical resolution of the detector ( $\Delta E$ )
- background as low as possible ( $B$ )

# Experiment Silicon Pixel Telescope (SPT)

- TGV III experiment (Location: LSM Modane)
- Measurement of  $2\nu$  EC/EC (g.s. to g.s) in  $^{106}\text{Cd}$

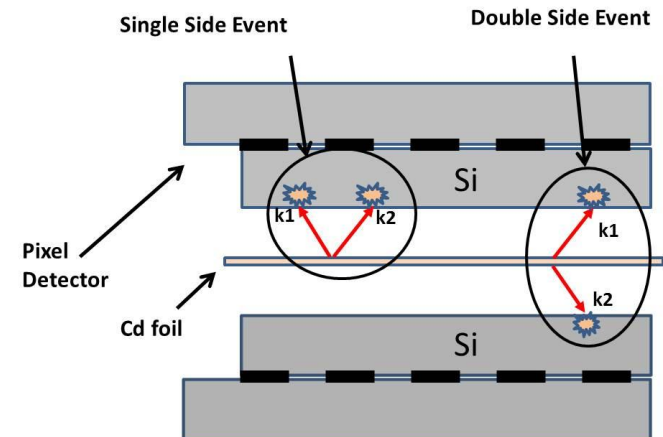


$$Q_{\text{EC/EC}} = 2778\text{keV}, \quad \text{ROI: } 19\text{keV} \leq E_X \leq 23\text{keV}$$



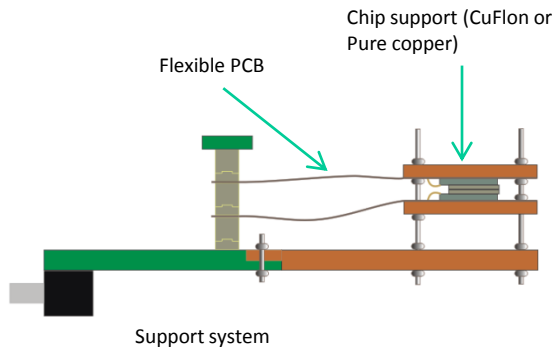
**TGV II  
detector idea**

- Signature of the process:- **2 X-rays (21 keV) in coincidence**
- Majority of above signature events will form **Single Side Events (SSE)** and **Double Side Events (DSE)**
- **SSE** occurs when both event deposit on same side
- **DSE** occurs when events deposit on opposite side

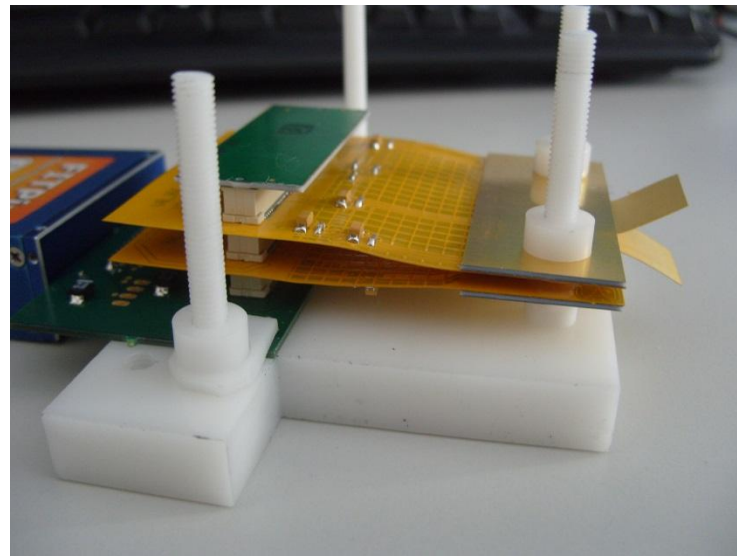


**SPT idea**<sup>19</sup>

# Flex-Rigid SPT

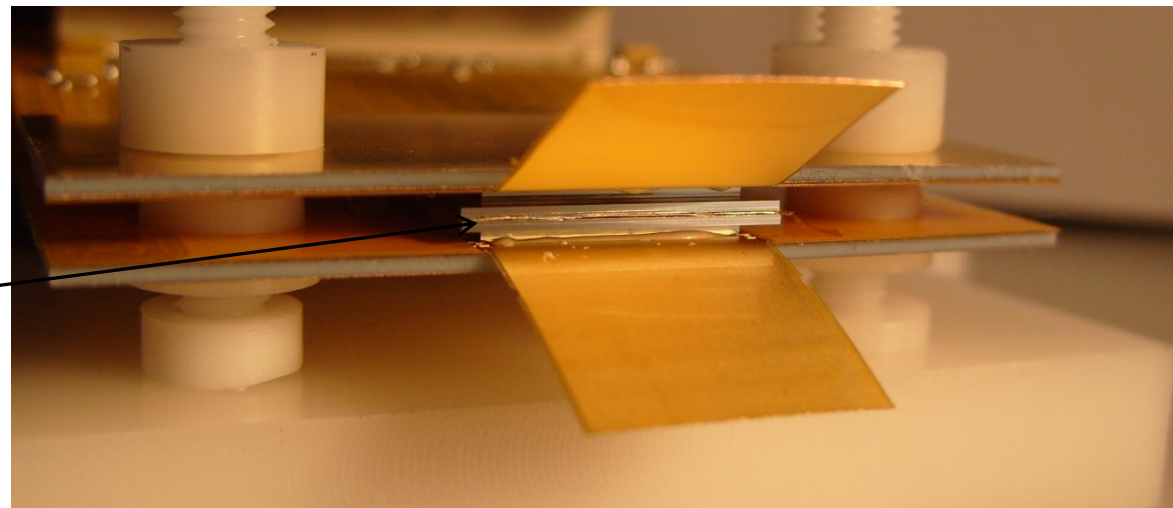


Schematic of flex-rigid SPT



Flex-Rigid prototype

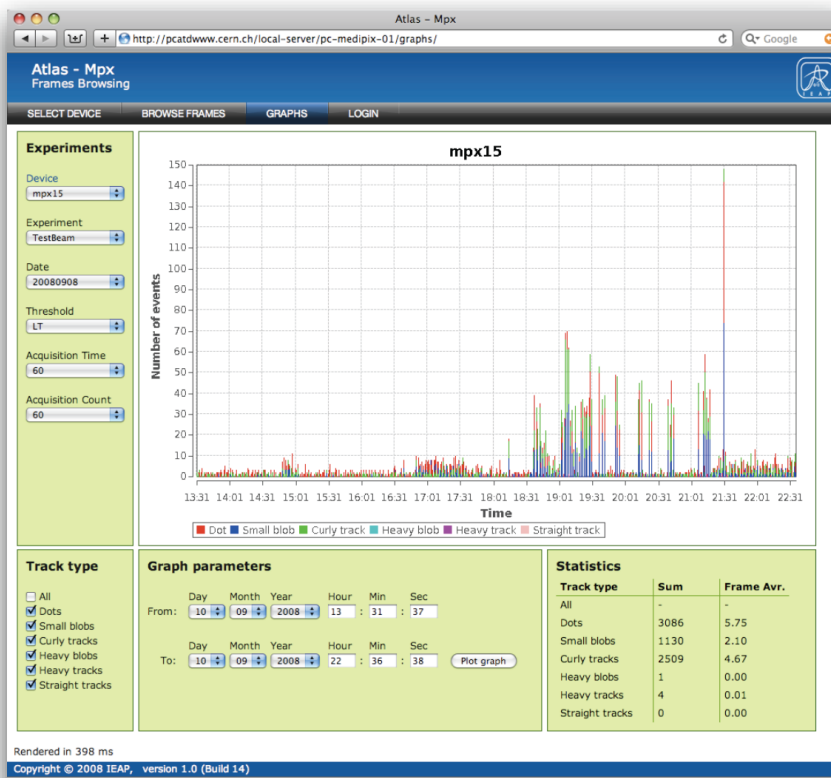
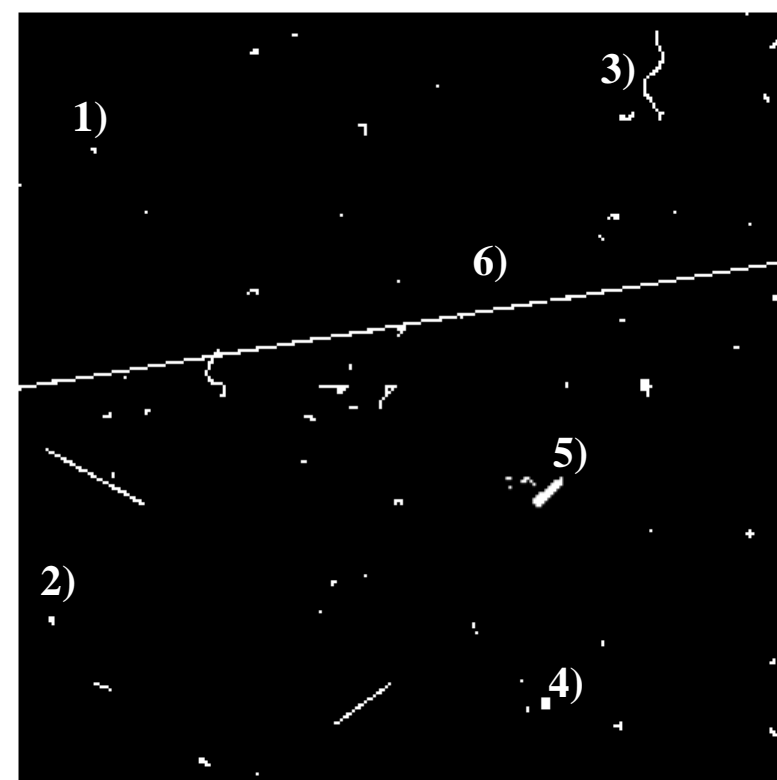
Cd foil



Close-up of the Si-Cd-Si "sandwich", with 50  $\mu\text{m}$  nat. Cd, 500  $\mu\text{m}$  Si sensors

## Six categories of characteristic patterns were introduced in "tracking mode":

- 1) Dot – Gamma and X-rays
- 2) Small blob – Gamma and X-rays, low energy electrons
- 3) Curly track – electrons (MeV range)
- 4) Heavy blob - energetic particles with low range (alpha particles,...)
- 5) Heavy track - energetic heavy charged particles (protons,...)
- 6) Straight track – energetic light charged particles (MIP, Muons,...)



Data Visualization Application is open to internet:

<http://cern.ch/atlas>

Operation -> Radiation monitors -> ATLAS-MPX

## Applications:

Organizing international conferences, Education of young students (summer schools), lectures for public.

1. Workshop on calculation of double-beta-decay matrix elements (MEDEX) – organized by IEAP CTU, Univ. of La Plata, Univ. of Jyväskylä. First workshop – 1997 (every two years). Leading theoreticians and experimentalists in the field (40-50 participants). Student session. Printed by AIP (e.g. AIP Conference proceedings 1417).
2. Summer school Nuclear physics and Accelerators in Biology and Medicine – organized by IEAP CTU, Adam Mickiewicz Univ., JINR from 1999 every two years. 80-100 students having also possibility to present their results. Printed by AIP (e.g. AIP Conference proceedings 958, 1204).
3. Conference IWORID – Radiation Imaging detectors, 2009 in IEAP CTU, printed by Elsevier, editors J. Jakubek, M. Jakubek, S. Pospisil, Z. Vykydal.
4. University of 3<sup>rd</sup> age – two lectures (one semester each), “Secrets of microworld”, “Laws of microworld”. Almost 400 participants.

## Future scientific plans in fundamental research:

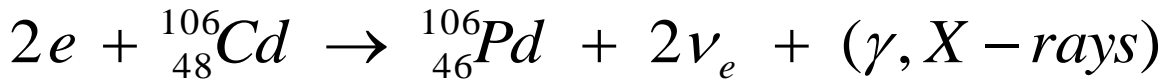
- 1) Particle physics: CERN, ATLAS, MoeDal, theory – important part of our fundamental research. IEAP is an experimental base of CTU in particle and nuclear physics, but after 10 years the role of theory is substantially increased (interpretation of experimental data).
- 2) Non-accelerator experiments:
  - a. **TGV** – to reach level of  $10^{21}$  years for EC/EC decay using TGV II spectrometer and Si Timepix stacks.
  - b. **SuperNEMO** – broad international collaboration in  $\beta\beta$  decay, leadership in Radon Task Group (1 of 5), participation on testing of scintillating detectors, HPGe spectroscopy.
  - c. **COBRA** –  $\beta\beta$  decay of  $^{116}\text{Cd}$ , our responsibility = CdTe pixel detectors, MC simulations, data processing from pixel detectors.
  - d. **PICASSO** – Canadian experiment in SNO lab (dark matter), our responsibility = participation in low background methods, data processing (new postdoc position at IEAP).
- 3) Nuclear physics – superheavy elements, hypernuclei (cooperation with JINR), experiments at VdG, experiments with pixel detectors.

# Výsledky TGV

**1) měření s  $^{48}\text{Ca}$**  –  $2\nu\beta\beta$ , *Nuclear Physics A700(1-2) (2002) 17-24*

$$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} = (4.2^{+3.3}_{-1.3}) \times 10^{19} \text{ y} \quad T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.5 \times 10^{21} \text{ y} \quad (90\% \text{ CL})$$

**2) měření s  $^{106}\text{Cd}$**  –  $2\nu\text{EC}/\text{EC}$ , g.s.  $\rightarrow$  g.s.



$$T_{1/2}^{2\nu\text{EC}/\text{EC}} ({}^{106}\text{Cd}) > 4.2 \cdot 10^{20} \text{ y} \quad (90\%)$$

