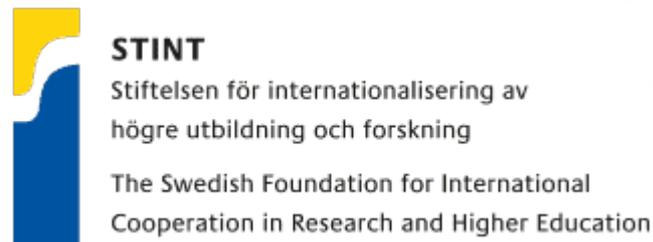
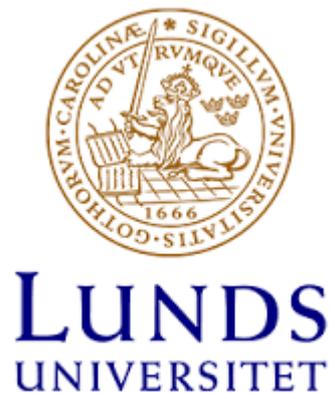




# The HIBEAM/NNBAR Experiment at the ESS

**Bernhard Meirose**

**2<sup>nd</sup> HIBEAM NNBAR Sweden-Brazil STINT Workshop**





# O experimento HIBEAM/NNBAR no ESS

Bernhard Meirose

2º STINT Workshop HIBEAM NNBAR Suécia-Brasil



**Por que violação de  
número bariônico (VNB)?**

# Como surgiu a conservação de número bariônico?



Tudo remonta a Hermann Weyl em 1929.

- Weyl postulou a conservação de número de bariônico (CNB) como uma forma de explicar a estabilidade da matéria.
- Se existe uma quantidade conservada atribuída a todos os bárions, o bárion mais leve (o próton) não pode decair.
- Isso é análogo à conservação de carga e ao elétron. O elétron é a partícula carregada mais leve, portanto não pode decair para um estado mais leve (digamos, 2 fótons), pois isso violaria a conservação da carga.
- Parece razoável, mas CNB não é nada como conservação de carga...

# Como surgiu a conservação do número de bárions...? É ela necessária?

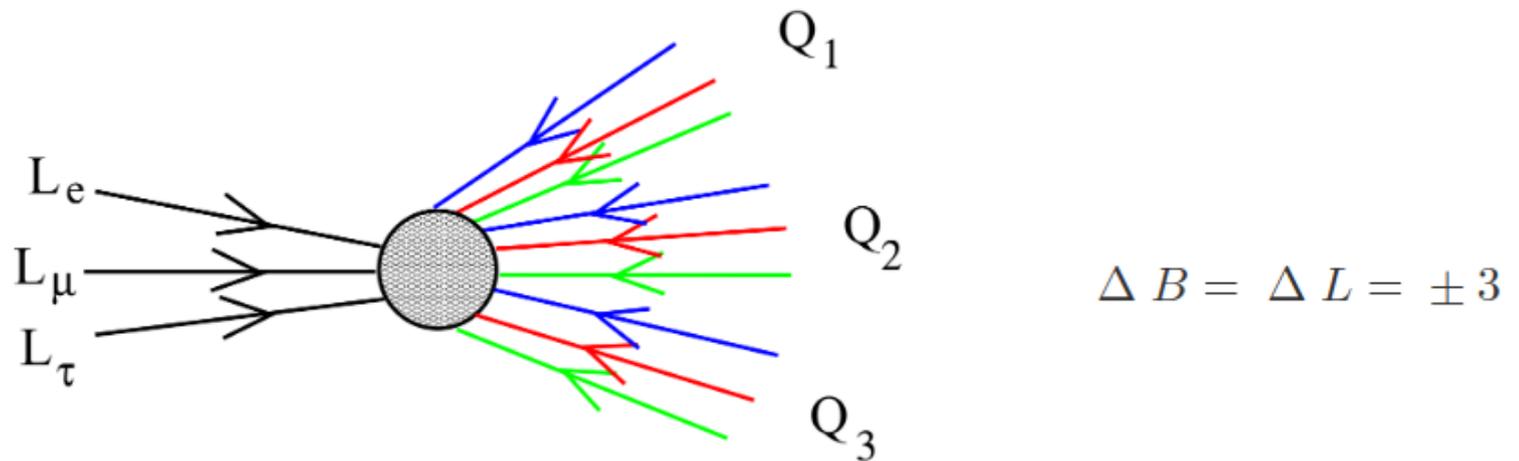
- A conservação da carga é uma consequência direta da invariância de calibre eletromagnético - uma simetria local genuína acompanhada pelo fóton como bóson de calibre.
- Não há simetria no Modelo Padrão (MP) que exija a conservação do número de bárions.
- O próprio MP não exige que  $B$  seja conservado *a priori*.
- CNB é considerado uma simetria acidental.
- Ou seja, não é pré-imposta pela Lagrangiana do modelo.
- Somente  $B - L$  é estritamente conservada no SM...



# Número bariônico no MP

- A VNB existe no MP devido a efeitos não perturbativos ( 'tHooft [Phys. Rev. Lett. 37 (1976) 8] ).
- Instantons violam  $B + L$  , mas não  $B - L$
- O número bariônico pode ser violado pela anomalia triangular, onde quarks se aniquilam com léptons.

$$\partial_\mu J_{B+L}^\mu = \frac{3g}{32\pi} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} W_a^{\mu\nu} W_a^{\rho\sigma}$$



Efeito minúsculo, mas implica que o Modelo Padrão mínimo já tem VNB.

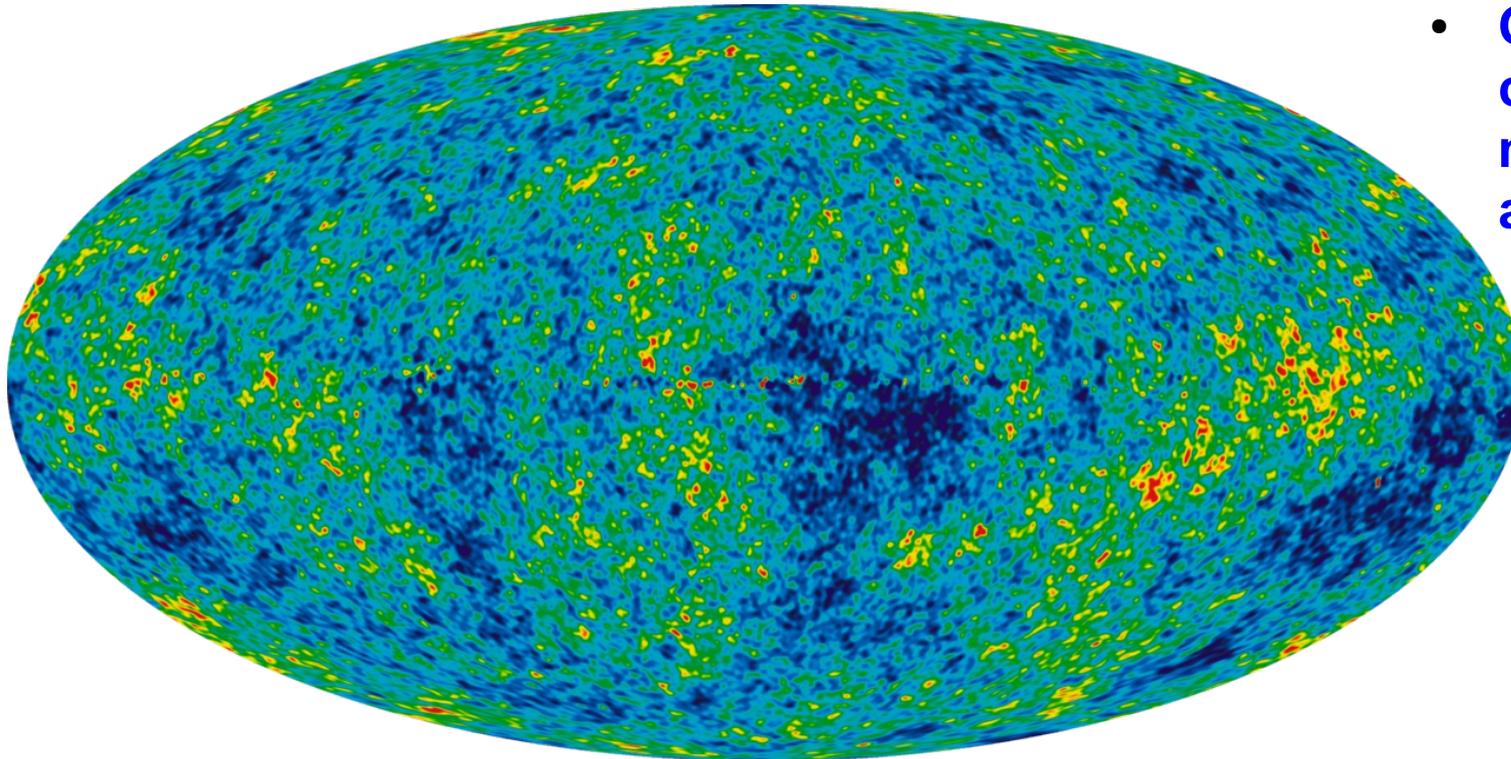
**O que VNB explica?**

# Problema: assimetria bariônica do universo (ABU)

Expectativa do modelo padrão:

Observado\*:

$$\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 10^{-18} \quad \text{vs.} \quad \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 6 \times 10^{-10}$$

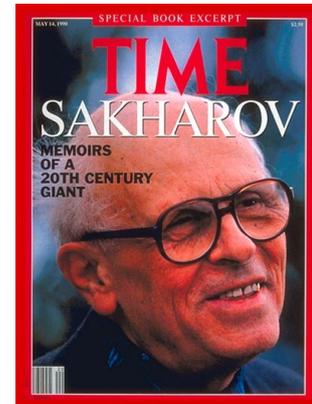


- O universo é composto de matéria, mas não de antimatéria

\* e.g. WMAP, COBE, Planck

# Condições de Sakharov para a bariogênese

- Bariogênese: processo físico que ocorreu no Universo primitivo responsável pela assimetria bariônica.
- Ingredientes necessários para criar assimetria bariônica:
  - 1. Violação de número bariônico (VNB)
  - 2. Perda do equilíbrio térmico
  - 3. Violação de C, CP
- Esses princípios são atribuídos a Sakharov (JETP Lett. 5 1967).
- **A necessidade de VNB é óbvia.**



## Violation of $CP$ invariance, $C$ asymmetry, and baryon asymmetry of the universe

A. D. Sakharov

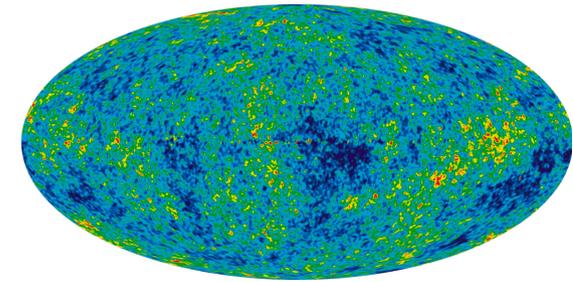
(Submitted 23 September 1966)

Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32–35 (1967) [JETP Lett. 5, 24–27 (1967).

Also S7, pp. 85–88]

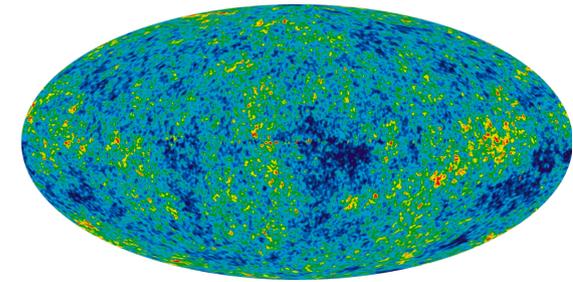


# Pode o MP explicar a bariogênese?



- A probabilidade de processos via instantons ocorrerem hoje é exponencialmente suprimida e provavelmente irrelevante.
- Um processo com VNB que ocorra no presente precisa portanto, de um mecanismo além do MP.
- Em situações mais extremas, como o universo primordial em temperaturas muito altas, os processos de violação do número bariônico e leptônico podem ser rápidos o suficiente para desempenhar um papel significativo na bariogênese.

# Pode o MP explicar a bariogênese?



- Em altas temperaturas, a anomalia do MP permite a conversão de bárions em antileptons e de antibárions em léptons. No entanto, ainda é necessário preservar  $B - L$  (no MP).
- No entanto, é muito difícil obter a assimetria observada sem violar a própria  $B-L$ . E os cenários que tentam usar os instantons do MP como a única fonte de  $ABU$  parecem exigir mais violação de  $CP$  do que o previsto pelo MP.
- Tópico de pesquisa - a resposta não é realmente conhecida.

# Além da bariogênese

- Suponha que meu modelo comece com um universo em que já exista uma pequena preferência pela matéria em relação à antimatéria.
- Logicamente possível.
- Nesse cenário, a bariogênese não seria necessária.
- Tópico de pesquisa com artigos do tipo "isso pode ser feito!" e "isso não pode ser feito"...
- "Não pode ser feito" mais popular

Can the baryon asymmetry arise from initial conditions?

Gordan Krnjaic  
Phys. Rev. D **96**, 035041 – Published 31 August 2017

Article   References   Citing Articles (6)   Supplemental Material   PDF   HTML   Export Citation

>

### ABSTRACT

In this paper, we quantify the challenge of explaining the baryon asymmetry using initial conditions in a universe that undergoes inflation. Contrary to lore, we find that such an explanation is possible if net  $B - L$  number is stored in a light bosonic field with hyper-Planckian initial displacement and a delicately chosen field velocity prior to inflation. However, such a construction may require extremely tuned coupling constants to ensure that this asymmetry is viably communicated to the Standard Model after reheating; the large field displacement required to overcome inflationary dilution must not induce masses for Standard Model particles or generate dangerous washout processes. While these features are inelegant, this counterexample nonetheless shows that there is no theorem against such an explanation. We also comment on potential observables in the double  $\beta$ -decay spectrum and on model variations that may allow for more natural realizations.



arXiv > astro-ph > arXiv:2307.03049

Search...

Help | A

Astrophysics > Cosmology and Nongalactic Astrophysics

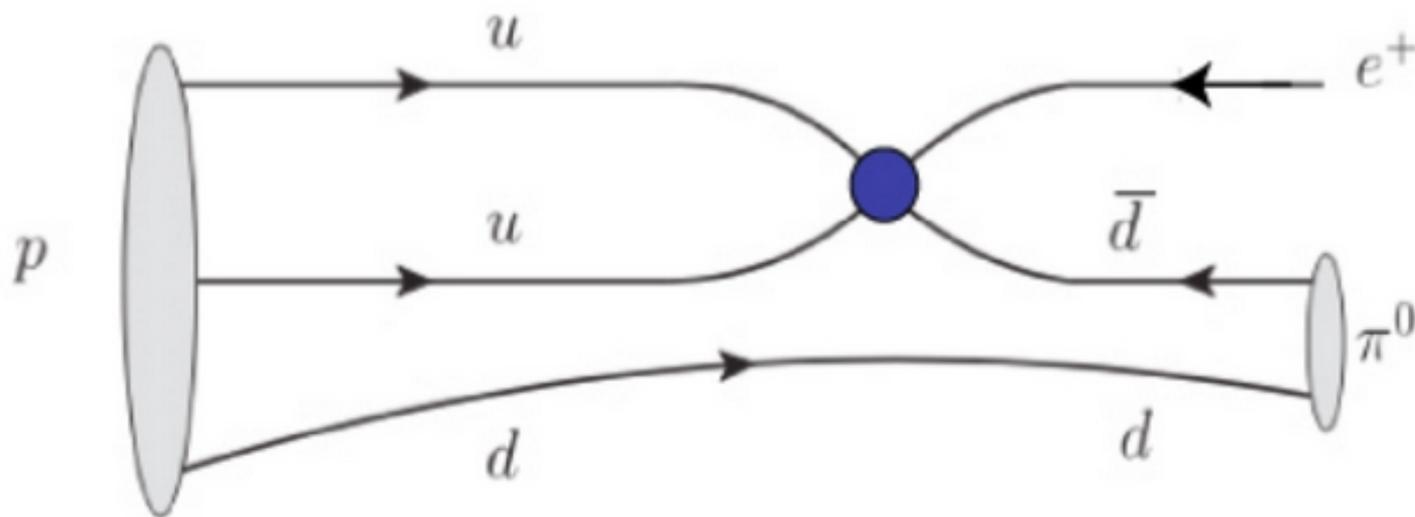
[Submitted on 6 Jul 2023]

## Can baryon asymmetry be explained by a large initial value before inflation?

Kai Murai, Fuminobu Takahashi, Masaki Yamada, Wen Yin

We show that the baryon asymmetry of the Universe cannot be explained by a large initial value before inflation because it inevitably predicts correlated baryon isocurvature perturbations that are already excluded by cosmic microwave background observations. Similar arguments can generally be applied to some models of dark matter.

# Decaimento do próton...?



# O que a não observação do decaimento do próton significa para as oscilações de nêutrons e VNB?



- Não muito.
- É tentador pensar que, dados os limites rigorosos para o decaimento do próton ( $> 10^{32}$  anos...), esse fato afetaria outros processos, como as oscilações de nêutrons.
- Afinal de contas, se o próton não decai, que espaço resta para a VNB?

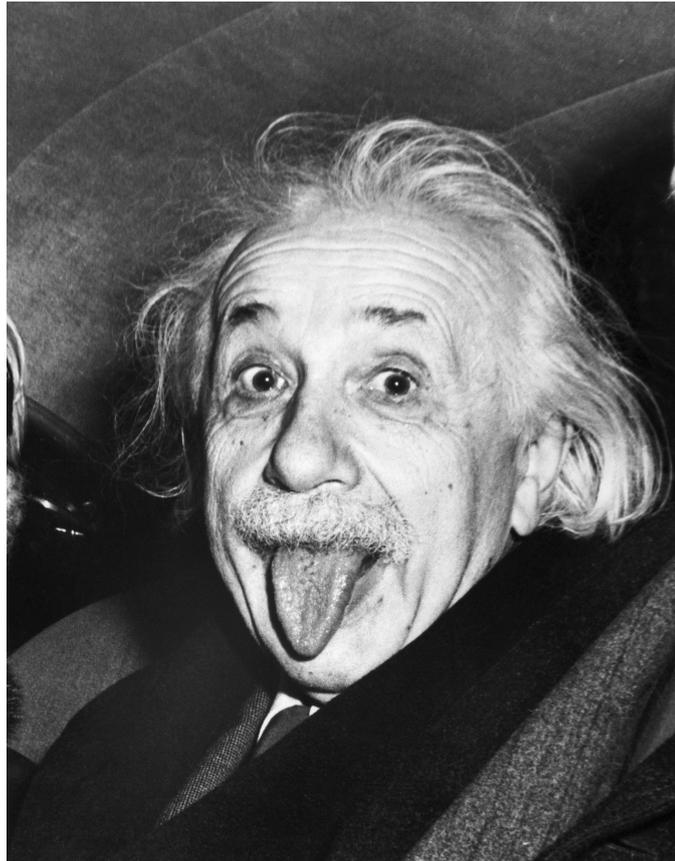
# O que a não observação do decaimento do próton significa para as oscilações de nêutrons e $\bar{\nu}_n$ ?



- **No entanto:**
- 1) O decaimento do próton exige que tanto o número leptônico quanto o número bariônico sejam violados (por exemplo,  $p \rightarrow \pi^0 e^+$ ). O número bariônico pode ser violado, mas o número leptônico poderia proteger o próton de decair.
- 2) Decaimento do próton é um processo  $\Delta B = 1$ , enquanto  $n \rightarrow \bar{n}$  é um processo  $\Delta B = 2$ . Uma simetria acentuada (que proibiria  $\Delta B = 1$ ) não impediria os processos  $\Delta B = 2$ .
- 3) Portanto: origens dos processos  $\Delta B = 1$  e  $\Delta B = 2$  podem ser muito diferentes. Há modelos além do MP (por exemplo, dimensões extras) com decaimento de prótons fortemente suprimido, mas com  $n \rightarrow \bar{n}$ .

- É claro que, como ainda acontece com (quase) tudo que é importante na física, não devemos nos esquecer...

- É claro que, como ainda acontece com (quase) tudo que é importante na física, não devemos nos esquecer... desse cara.



# Testes de precisão do princípio de equivalência

- O número bariônico é apenas uma simetria global → nenhum mediador associado.
- Os testes de precisão do princípio da equivalência não oferecem evidências de uma força de longo alcance acoplada ao número bariônico.

Test of the Equivalence Principle Using a Rotating Torsion Balance

S. Schlamminger, K.-Y. Choi, T. A. Wagner, J. H. Gundlach, and E. G. Adelberger  
Phys. Rev. Lett. **100**, 041101 – Published 28 January 2008

- **Significando:**
- Suponha que haja uma pequena força do tipo Coulomb acoplada a  $B = \text{número de prótons} + \text{neutrons}$  em um núcleo.
- Elementos químicos diferentes caíram em uma taxa diferente porque o  $B$  por quilograma é um pouco diferente devido às energias de ligação.
- Os experimentos de precisão concluem que os elementos caem à mesma taxa, como previsto pela Relatividade Geral.
- Requisito fundamental (ausente!) para uma hipotética simetria de calibre local que proíba VNB.



# Resumo teórico

- **Violação de número bariônico:**
- Não causaria estabilidade do próton (razão pela qual CNB foi inventada).
- Existe no MP em nível não-perturbativo.
- Explicaria mais naturalmente a bariogênese.
- Embora ainda não haja evidências de processos com VNB....
- ... há restrições experimentais que indicam que a CNB não é uma simetria local verdadeira.

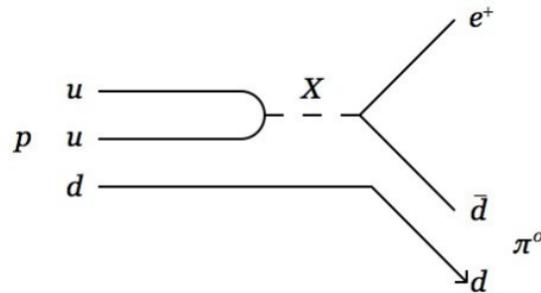


# Por que oscilações de nêutrons?

# Teste de regras de seleção

- Oscilações de nêutrons fornecem canal limpo para testar processo exclusivo de VNB.
- Puramente experimental: testar diferentes regras de seleção para VNB e VNL.

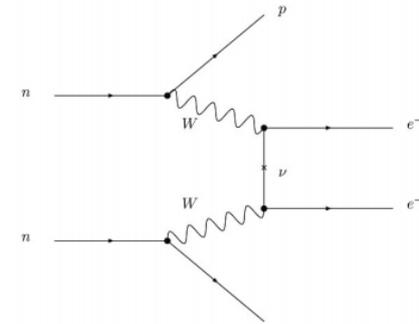
## Proton decay



$$\Delta B \neq 0, \Delta L \neq 0$$

## Neutrinoless double beta decay

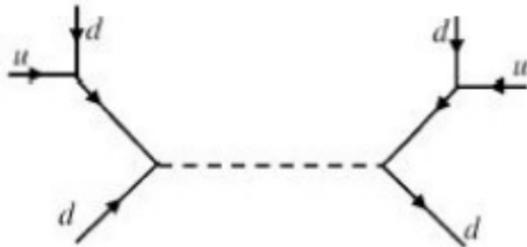
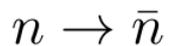
$$0\nu 2\beta$$



$$\Delta B = 0, \Delta L \neq 0$$

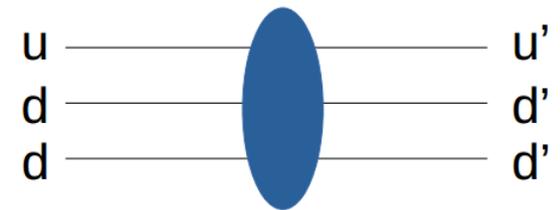
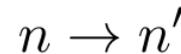
## Neutron Oscillation

### Neutron antineutron oscillation



$$\Delta B = 2, \Delta L = 0$$

### Neutron sterile neutron oscillation



$$\Delta B = 1, \Delta L = 0$$

# **Busca por oscilações de nêutrons**

# Busca por oscilações de nêutrons

- Pressuposto: violação do número bariônico (VNB)
- Se VNB:  $n \rightarrow \bar{n}$  permitido
- 
- Como?  $\rightarrow$  busca por  $n \rightarrow \bar{n}$  ligado ou livre
- **Para nêutrons ligados:** o sinal é a aniquilação do antineutron oscilado com outro núcleon.

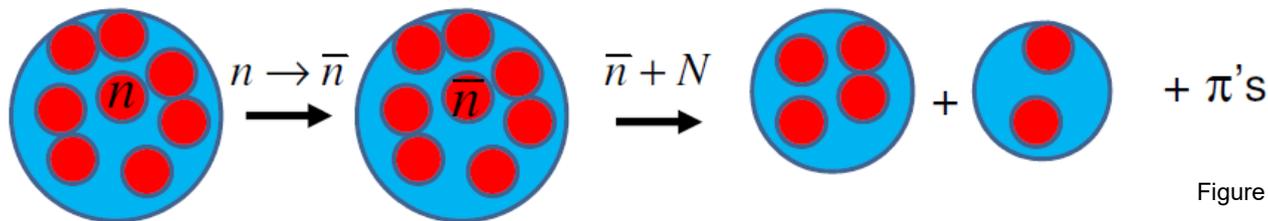
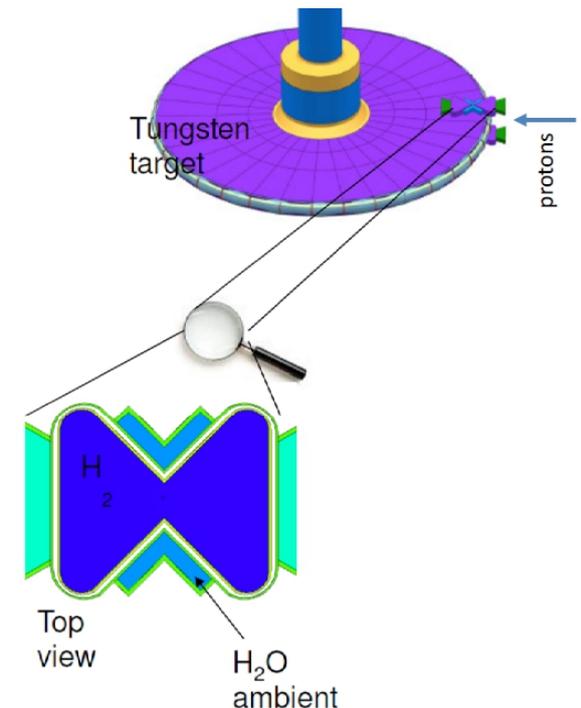
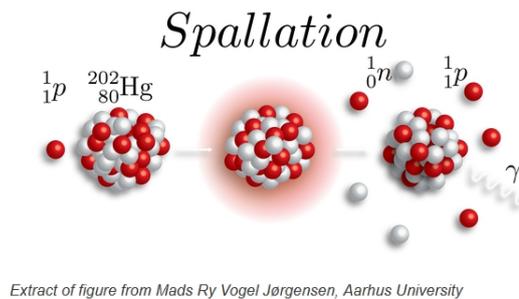


Figure by D. Milstead

- Taxa suprimida pelo fator de supressão nuclear  $R$  ( $\sim 10^{23}$ ) em relação aos nêutrons livres
- Dependente do modelo

# Busca por oscilações de nêutrons (cont.)

- Ou fazer isso usando nêutrons livres, mas:
- Os nêutrons estão “presos” em núcleos → vários MeV para liberação
  - fissão
  - espalação (pode ser mantida sob controle)



- Para aumentar a probabilidade de  $n \rightarrow \bar{n}$  :
- t grande → neutron lentos ("frios" → poucos meV) necessárias muitas colisões → moderadores
- O maior número possível de nêutrons →



# ESS



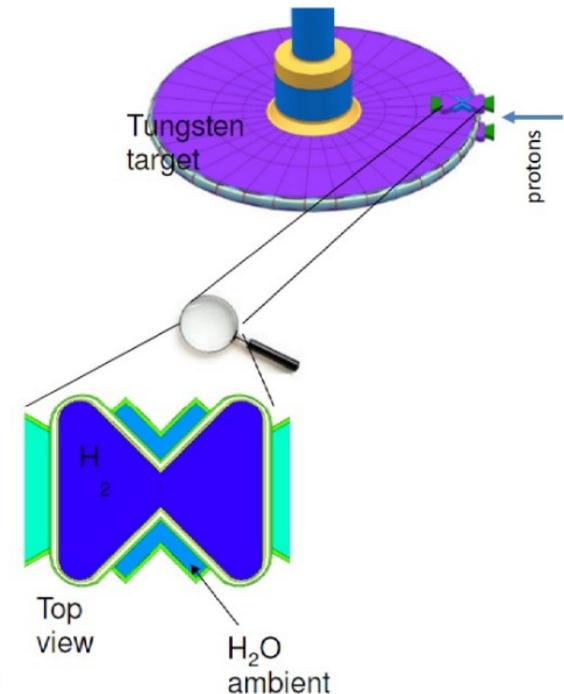
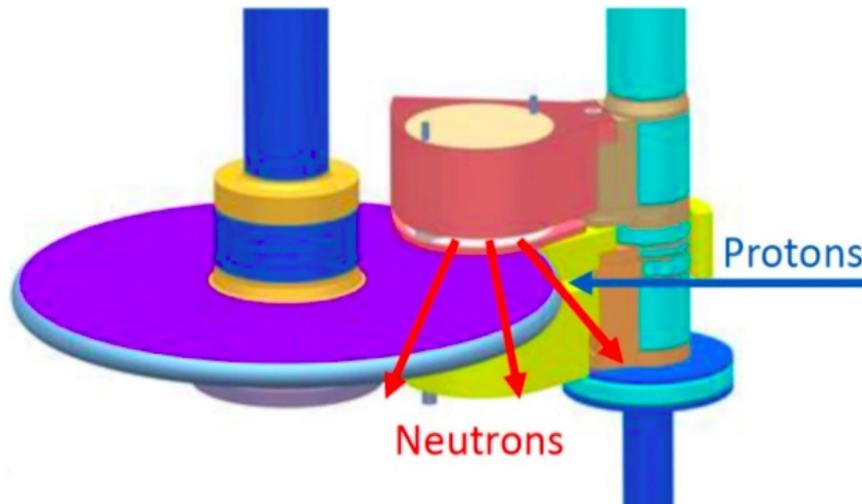
EUROPEAN  
SPALLATION  
SOURCE

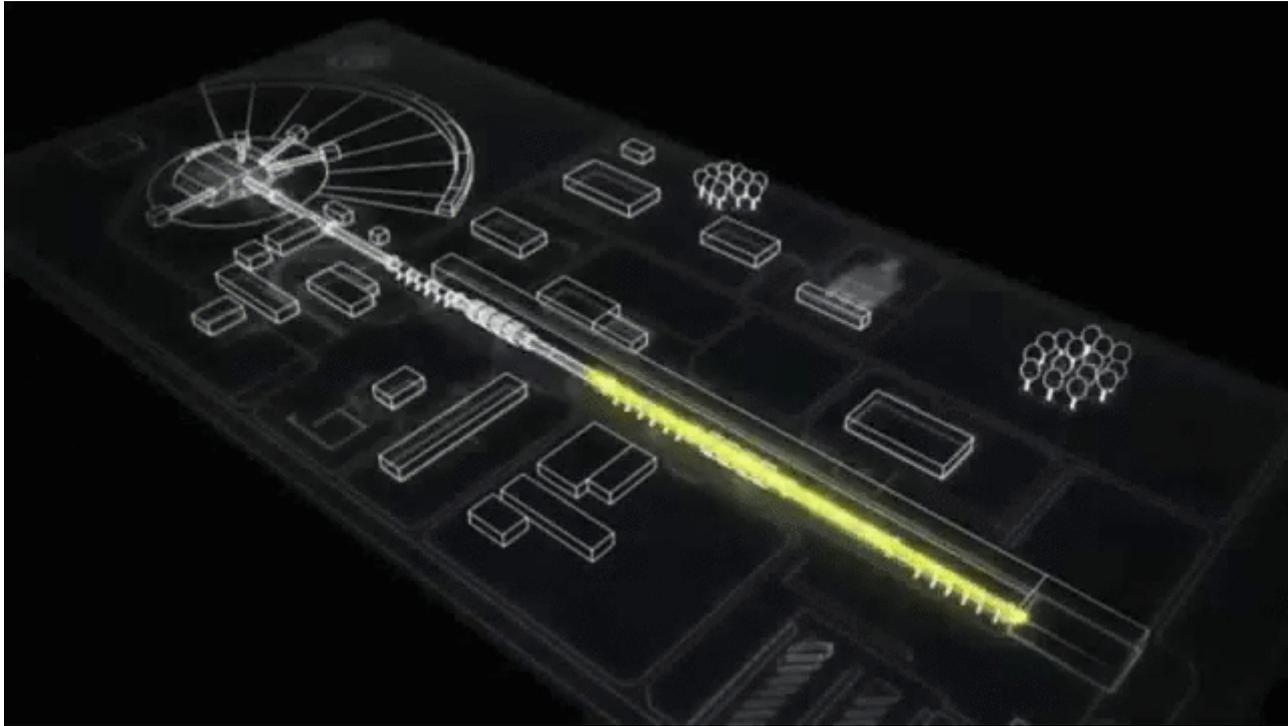


# ESS – a neutron factory



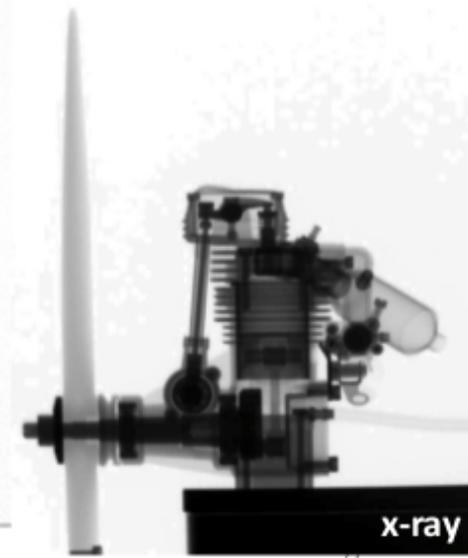
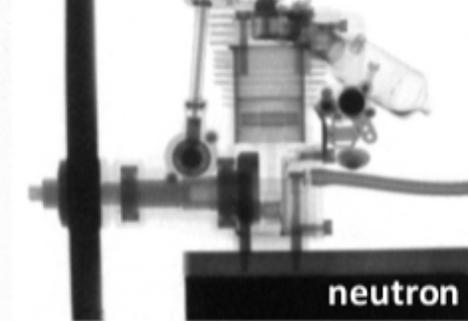
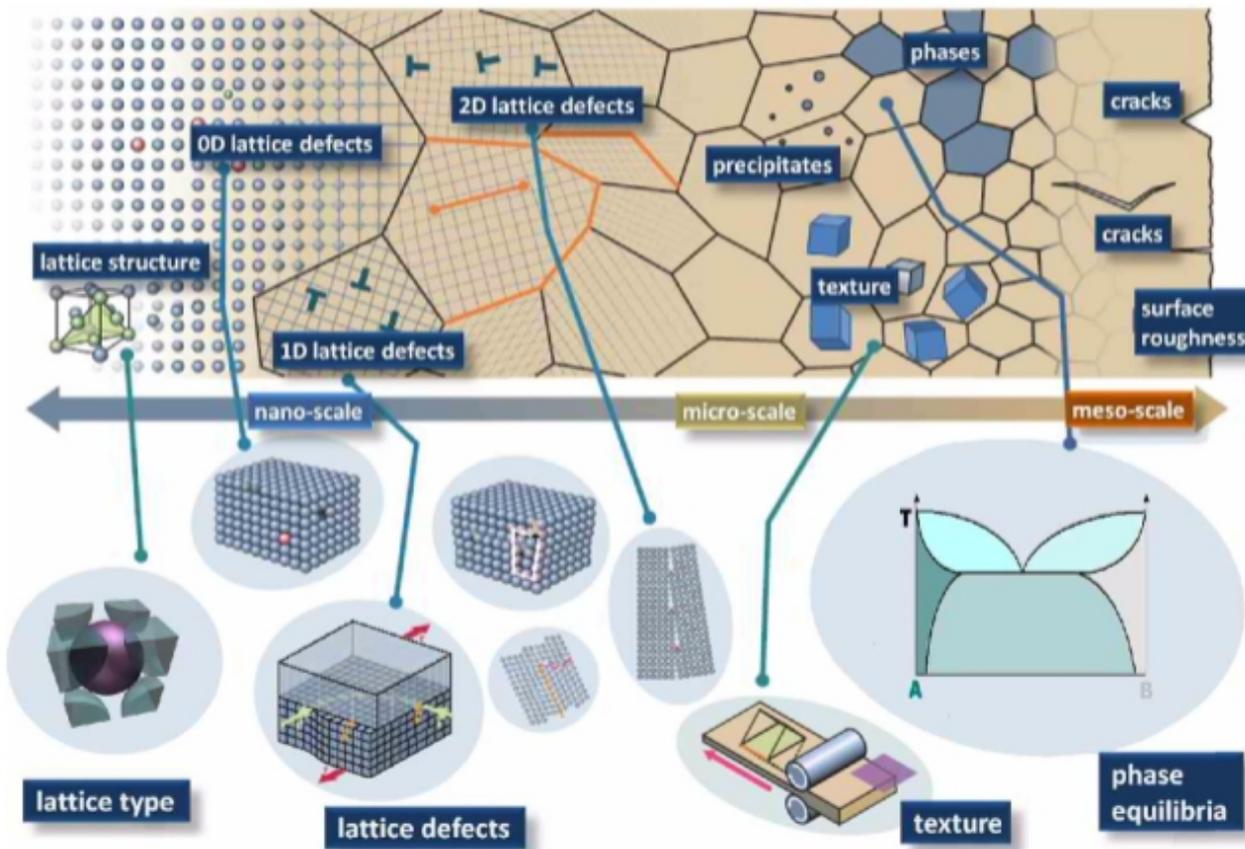
- Fonte de espalação de alta intensidade
- Local: Lund, Suécia
- Em construção (o programa do usuário começa em 2027)
- Prótons de 2 GeV (pulso longo de 3ms atinge alvo rotativo de tungstênio)
- Nêutrons frios após interação com moderadores ( $\sim 10^{12-13}$  n/s)
- Diâmetro da roda do alvo = 2,6 m





# Materials science at many length scales

Neutrons and X-rays are complementary



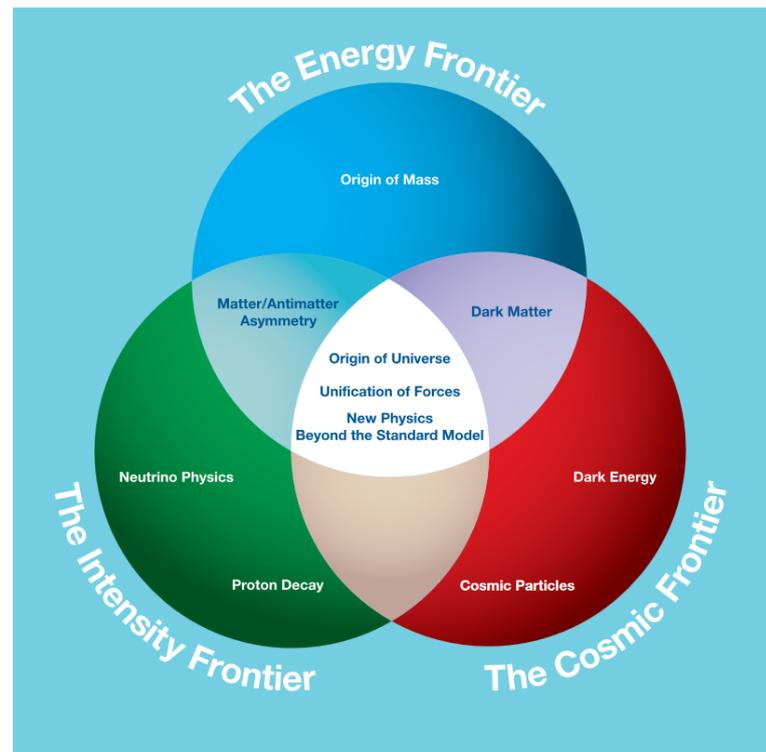
Source: <http://www.dierk-raabe.com/>

***For fundamental physics at ESS the neutron is "the patient, rather than the probe"***

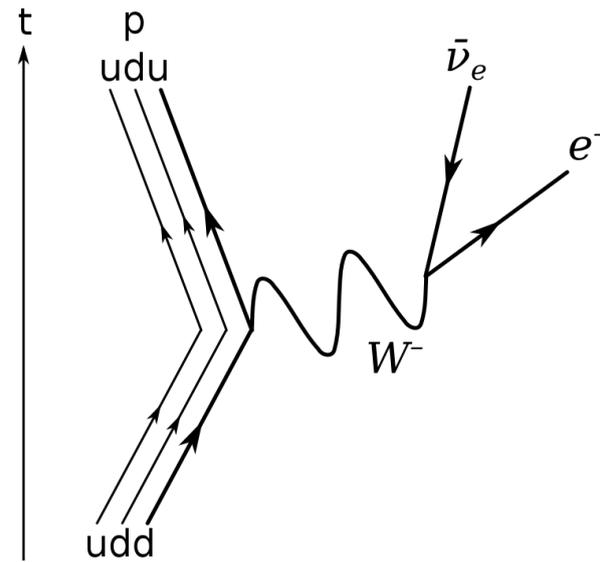
***Para a física fundamental no ESS, o nêutron é o objeto de investigação, e não o instrumento.***

# ESS - na fronteira de intensidade

- Fronteira de baixa energia e alta precisão complementar aos experimentos de alta energia
- Busca por fenômenos raros
- Sensível a escalas de nova física substancialmente em excesso em relação aos colisores
- Alta intensidade de nêutrons do ESS é um elemento crucial



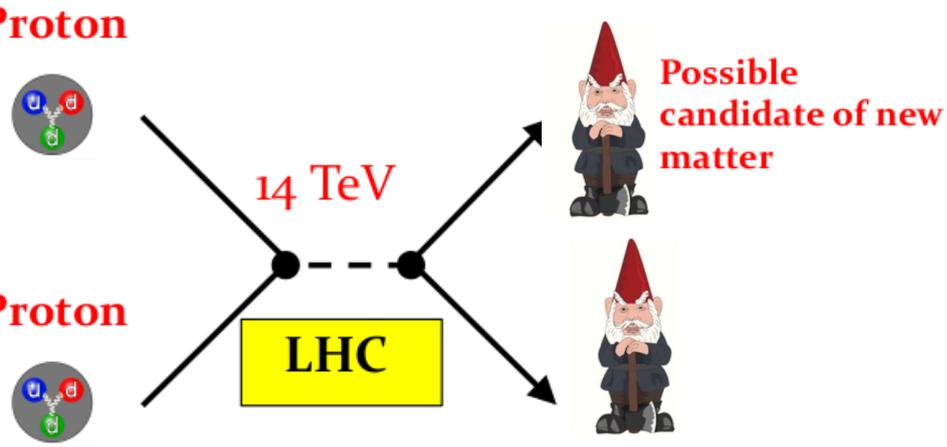
# Medição de precisão vs. medição direta



The way to find Beyond the Standard Model physics

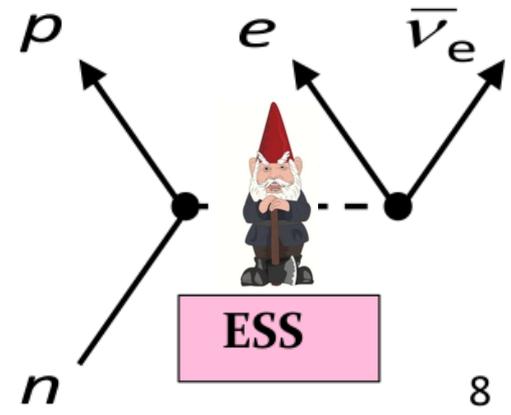
## Direct Searches

Produce new particles as real particles in pp collisions

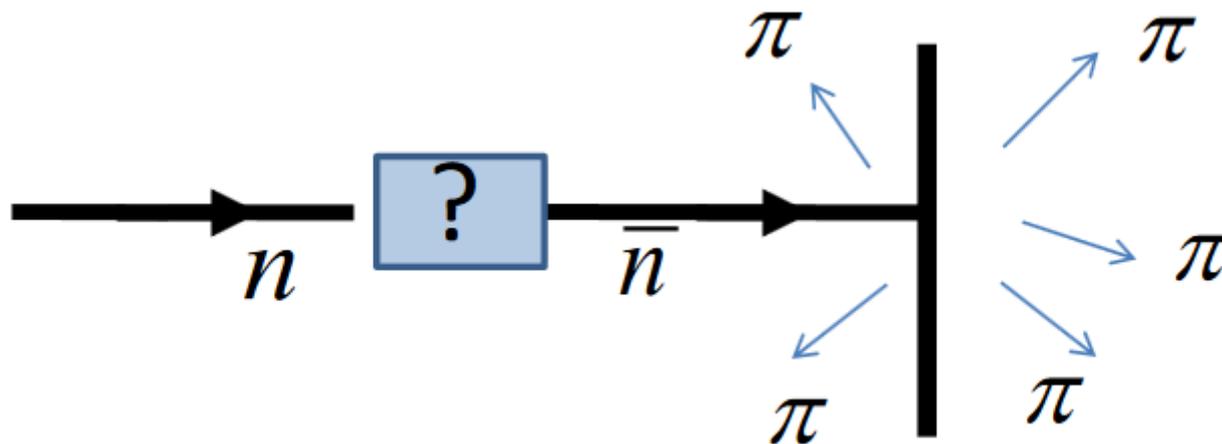


## Indirect Searches

New particles will appear as virtual particle in quantum loops



# Sinal de oscilação de nêutron-antinêutron (nêutrons livres)

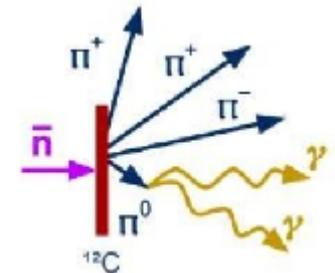
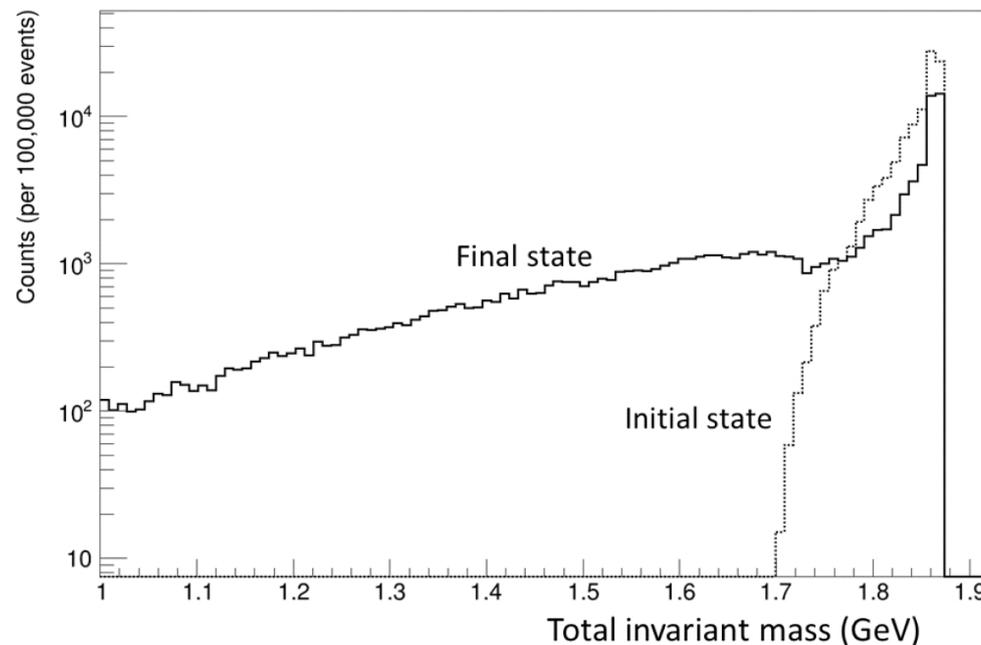


# Sinal de aniquilação de antineutrons

Model of  $\bar{n}$  annihilation in experimental searches for  $\bar{n}$  transformations

E. S. Golubeva, J. L. Barrow, and C. G. Ladd  
Phys. Rev. D **99**, 035002 – Published 5 February 2019

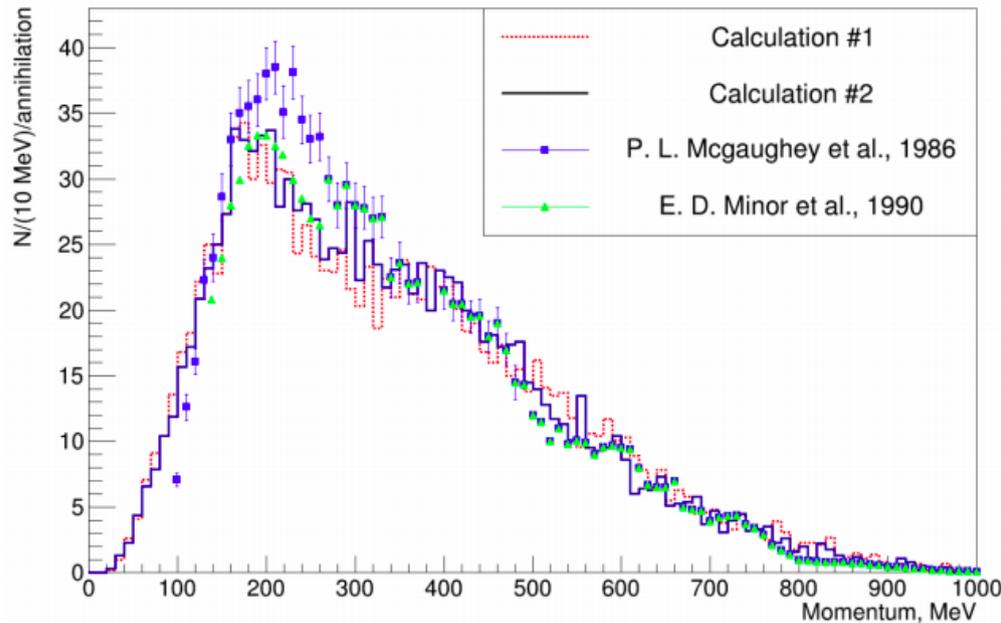
- Liberação de energia de  $\sim 2 \cdot m_n \sim 1,88$  GeV
- Distribuída por vários píons (5 em média), por exemplo:  $n + \bar{n} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + 3\pi^0$
- No entanto: em um experimento real, o antineutron se aniquilaria dentro de um núcleo - isso NÃO é o mesmo que a aniquilação no espaço livre.
- O nêutron é uma partícula de interação forte - o núcleo de carbono atua como um meio forte (strong medium).



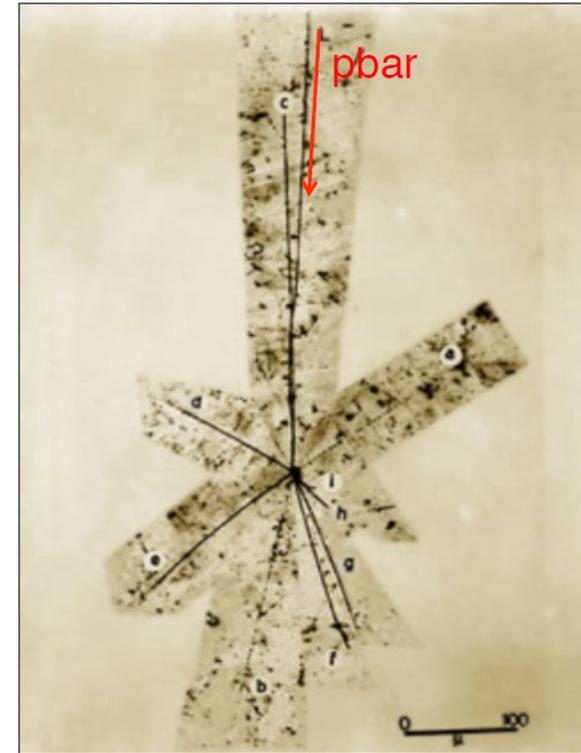
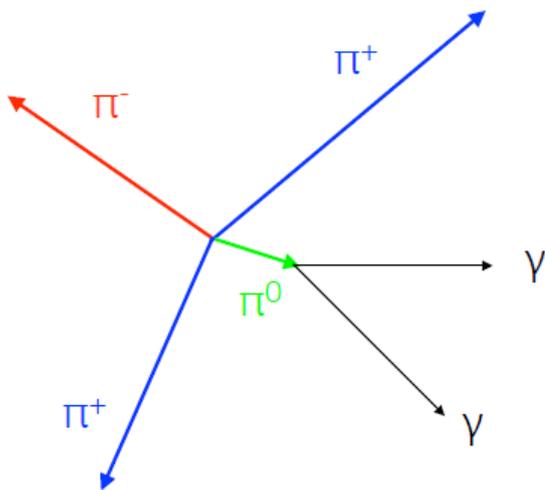
# Aniquilação de antineutrons

- Estados finais extrapolados de antipróton-núcleon:

## $\bar{p}C \rightarrow \pi^+$ Spectrum Matches Experiment Well



Based on 10,000 events  
See [here](#) and [here](#)



### Antiproton Star Observed in Emulsion\*

O. CHAMBERLAIN, W. W. CHUPP, G. GOLDHABER, E. SEGRÈ, AND  
C. WIEGAND, *Radiation Laboratory, Department of Physics,  
University of California, Berkeley, California*

AND

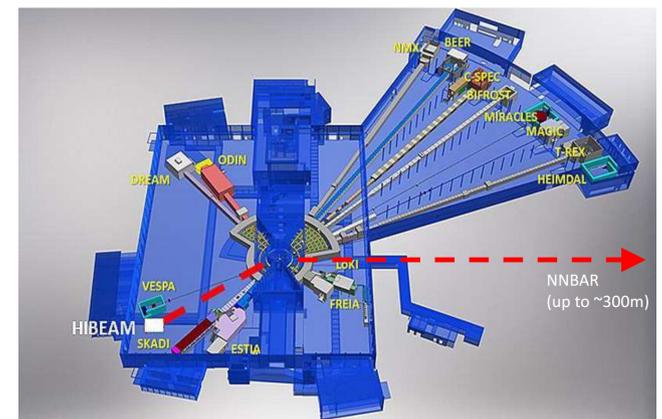
E. AMALDI, G. BARONI, C. CASTAGNOLI, C. FRANZINETTI, AND  
A. MANFREDINI, *Istituto di Fisica della Università, Roma  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare,  
Sezione di Roma, Italy*

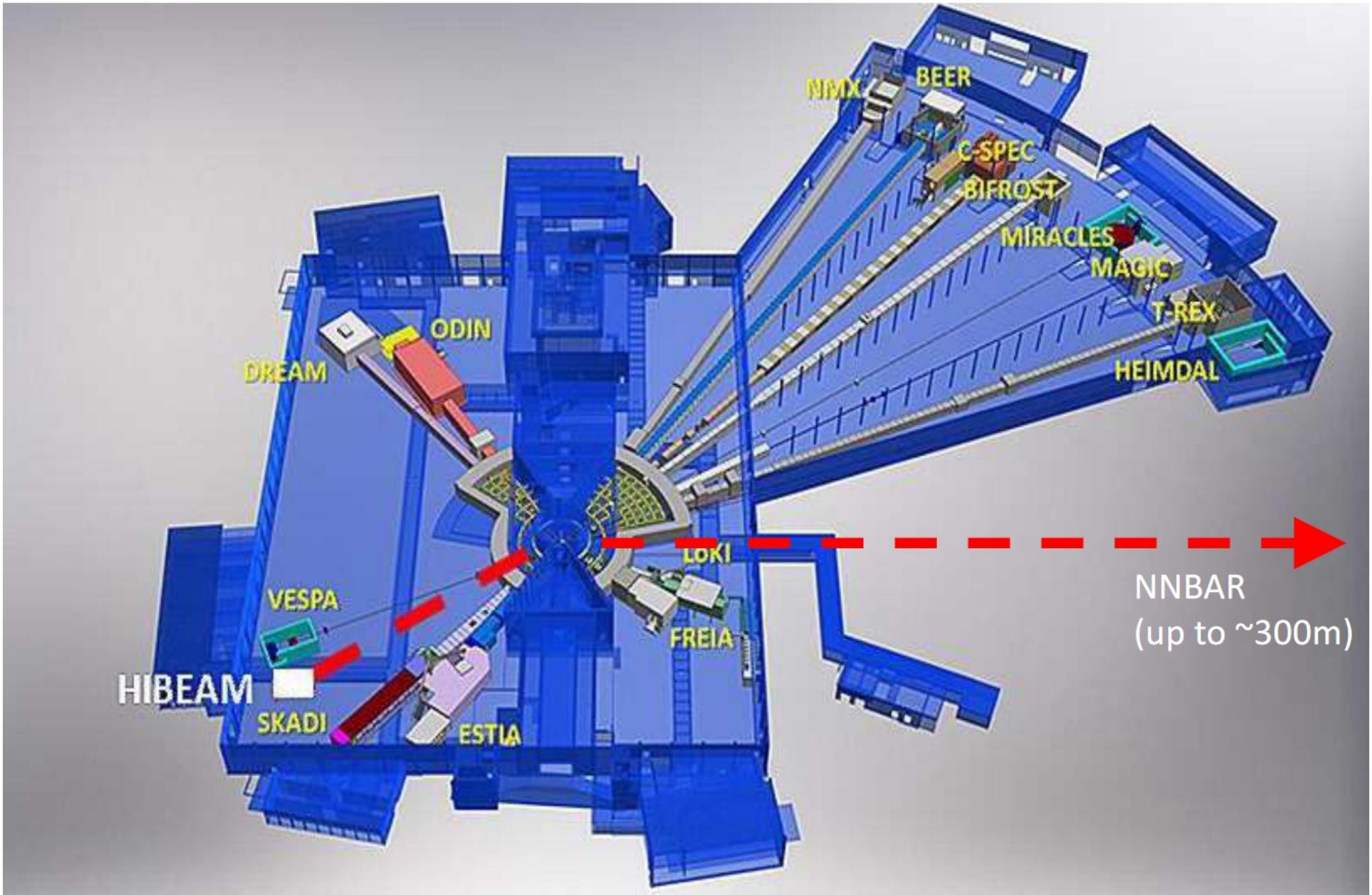
(Received December 16, 1955)

# **HIBEAM-NNBAR**

# HIBEAM e NNBAR

- Experimento em etapas
- **1. HIBEAM (High Intensity Baryon Extraction and Measurement)**
  - final da década de 2020
  - pesquisa líder mundial  $n \rightarrow n'$
  - pesquisa por  $n \rightarrow \bar{n}$
  - busca por  $n \rightarrow \bar{n}$  via nêutrons estéreis. Primeira pesquisa desse tipo.
  - P&D para o experimento completo.
- **2. NNBAR** – busca por  $n \rightarrow \bar{n}$  com precisão extremamente alta,
  - melhorar a sensibilidade à probabilidade de oscilação em  $\sim 10^3$
  - Após 2030





# Controle dos campos nos quais os nêutrons se propagam

Eg Free  $n \rightarrow \bar{n}$  state

$$\Psi = \begin{pmatrix} n \\ \bar{n} \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} E_n & \varepsilon \\ \varepsilon & E_{\bar{n}} \end{pmatrix}$$

$\varepsilon$  = mixing mass term

Probability to find an antineutron at time  $t$  is given by

$$P_{n\bar{n}}(t) = \frac{\varepsilon_{n\bar{n}}^2}{(\Delta E/2)^2 + \varepsilon_{n\bar{n}}^2} \sin^2 \left[ t \sqrt{(\Delta E/2)^2 + \varepsilon_{n\bar{n}}^2} \right] e^{-t/\tau_n},$$

$\Delta E = E_n - E_{\bar{n}}$  Require degeneracy between  $n, \bar{n}$

$\Rightarrow$  Zero magnetic field ( $< 10^{-5}$  G)

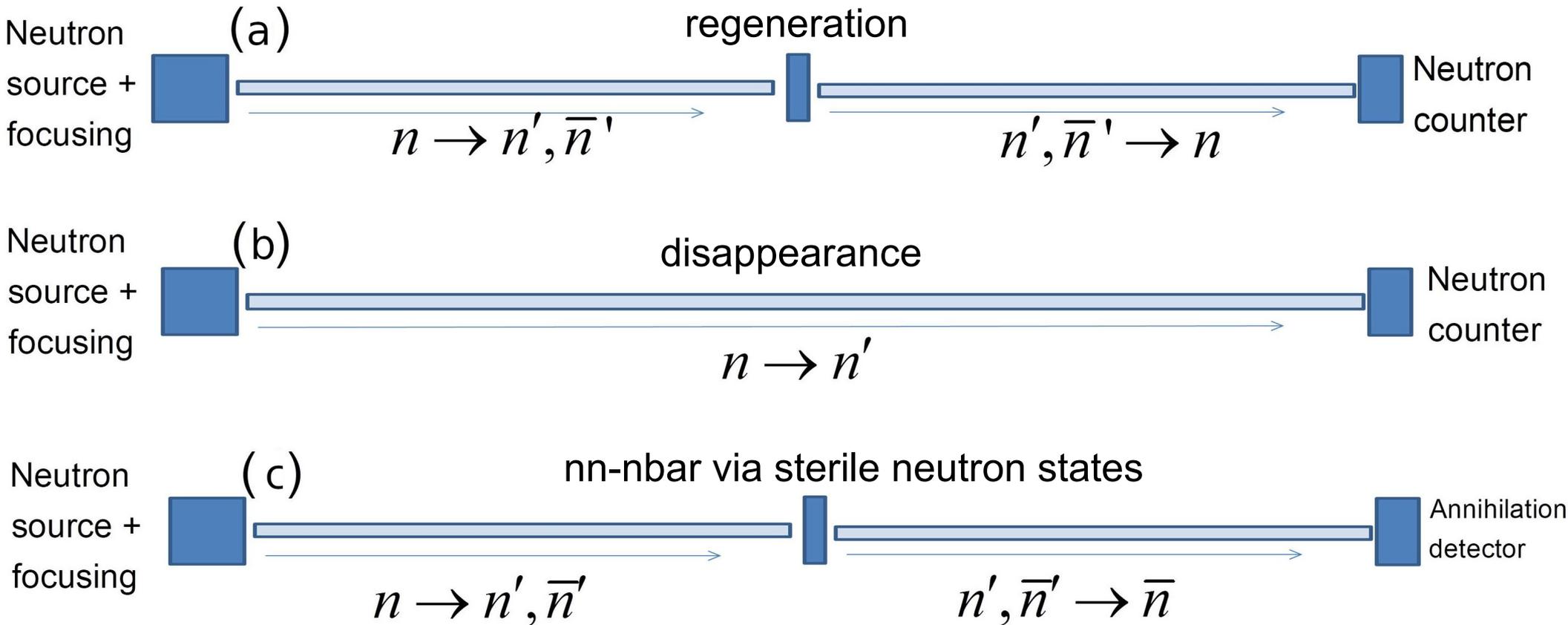
Similarly for  $n \rightarrow n'$

Magnetic field in dark sector

$\Rightarrow$  Scan for  $-1\text{G} < B < +1\text{G}$  in  $\sim \text{mG}$  steps

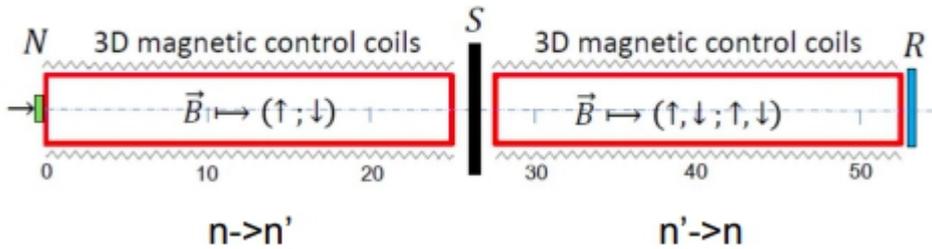
# Buscas no HIBEAM

$n \rightarrow n'$  possível com um campo B não nulo a ser otimizado para corresponder ao campo B no setor escuro

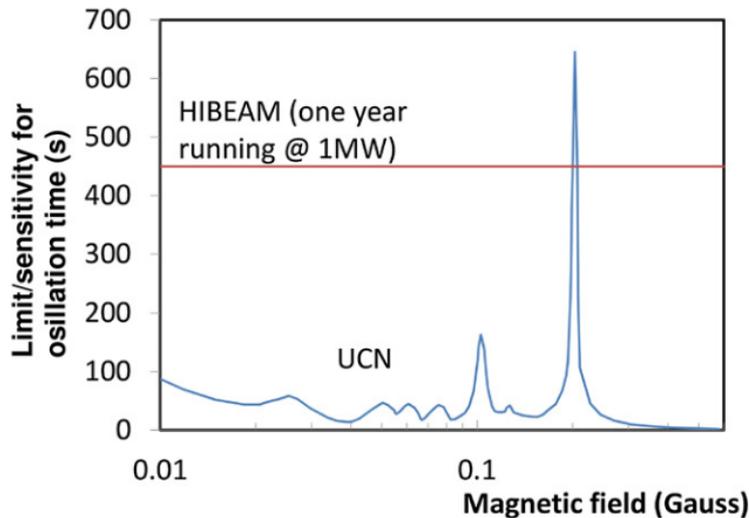
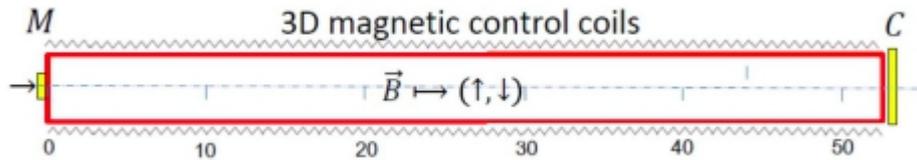


# Sensibilidade de descoberta do HIBEAM

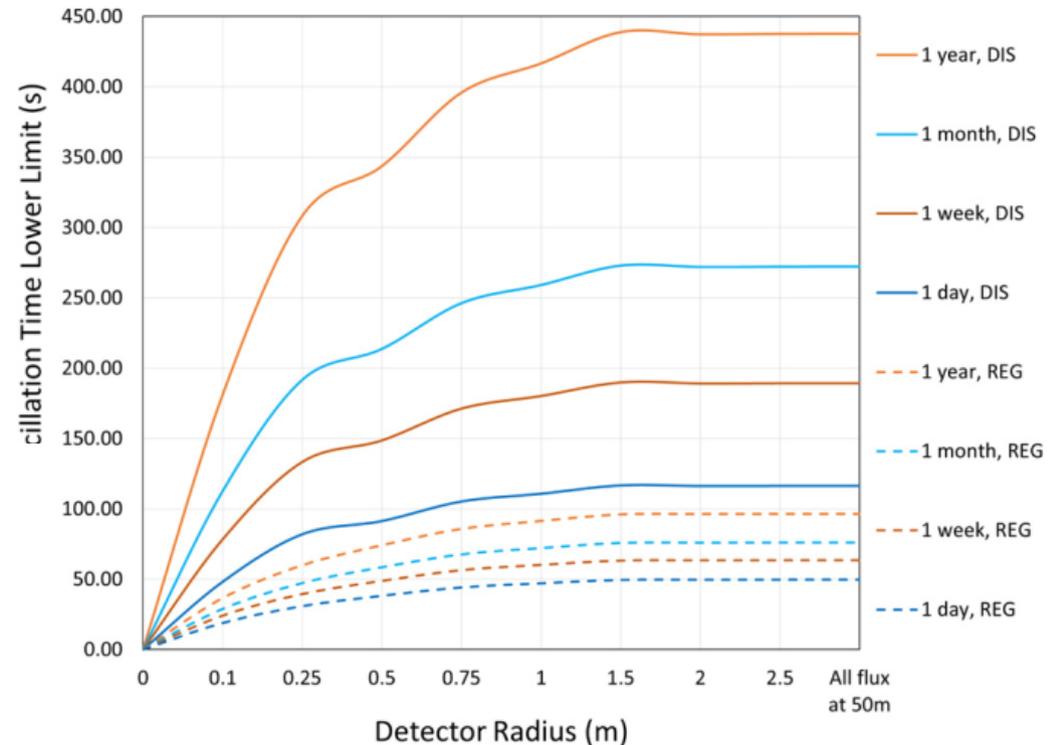
## Regeneration



## Disappearance



**Figure 22.** Excluded neutron oscillation times in blue for  $n \rightarrow n'$  disappearance from UCN experiments [40, 42, 44–47] as a function of the magnetic field  $\vec{B}$ . The projected sensitivity for HIBEAM (disappearance mode) is also shown in magenta for 1 year's running at the ESS assuming a power of 1 MW.



**Figure 21.** Sensitivity at 95% CL for the discovery of  $\tau_{n \rightarrow n'}^{\text{dis}}$  (disappearance, 'dis') and  $\tau_{n \rightarrow n'}^{\text{reg}}$  (regeneration, 'reg') for various detector radii for the nominal 1 MW HIBEAM/ANNI flux at 50 m. A background rate of  $1 \text{ n s}^{-1}$  is assumed for the regeneration search. Plots have been smoothed.

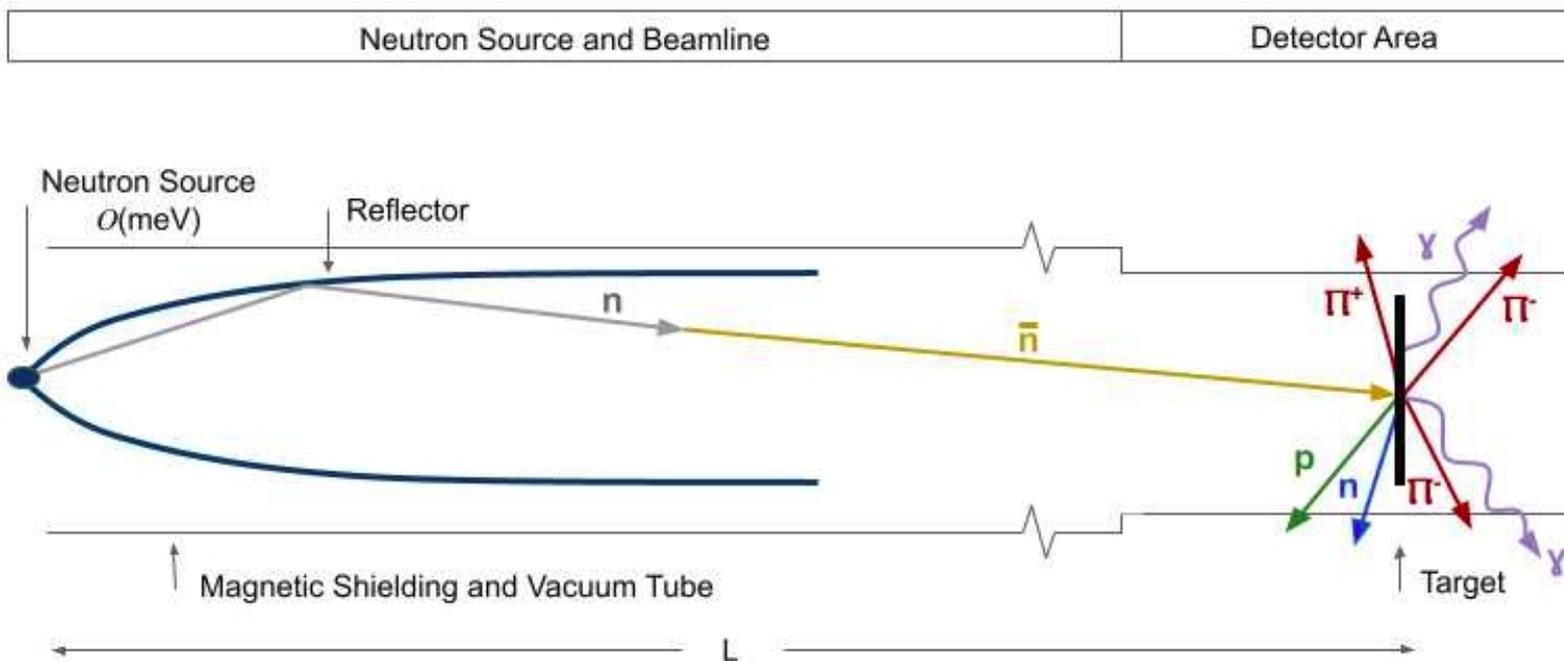
**NNBAR**

# NNBAR

- Objetivo: observar  $n \rightarrow \bar{n}$  (somente BN é violado por 2 unidades)
- Estratégia: deixar o máximo de nêutrons "voar" pelo maior tempo possível
- Probabilidade de transformação de nêutrons livres em antineutrons:

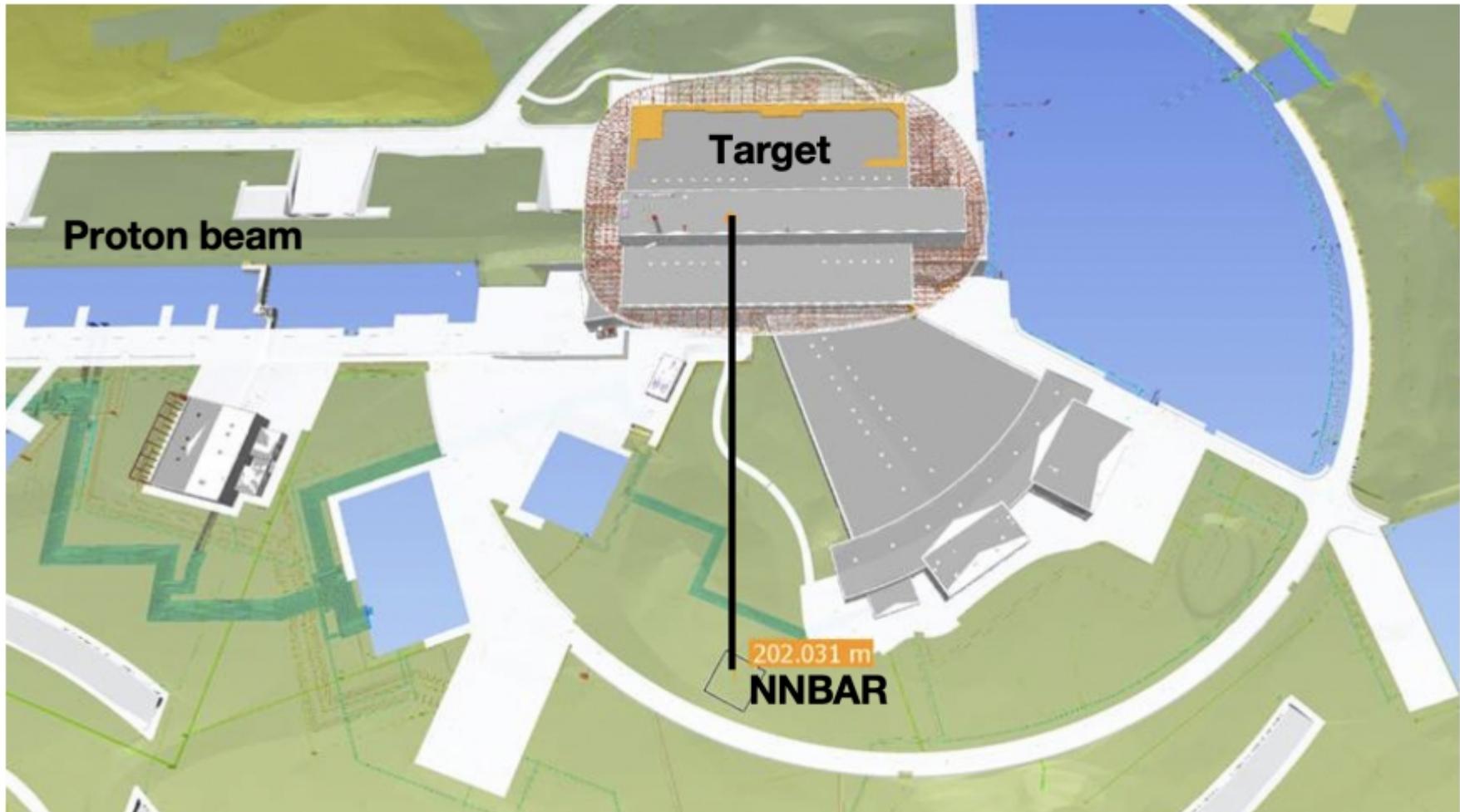
$$P(\bar{n}, t) = (t / \tau)^2 \quad \text{FOM} = Nt^2$$

- $t \rightarrow$  tempo de voo do nêutron;  $\tau \rightarrow$  "tempo de oscilação" (dependente do modelo)

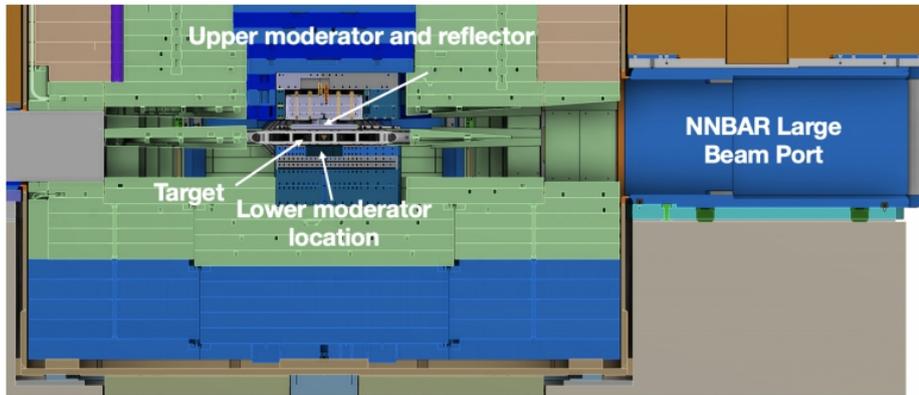


$$\tau > 8.7 \cdot 10^7 \text{s} \quad (\text{ILL})$$

# NNBAR@ESS



# NNBAR Large Beam Port (LBP)



**Investimento substancial  
(~ SEK 4M ~ R\$ 2M)  
do ESS com o NNBAR em mente**

Figure 2: Cross sectional view of the ESS target/moderator area and the inner shielding. In the figure it is shown the location of the ESS upper and lower moderator. The NNBAR experiment will view both moderators.

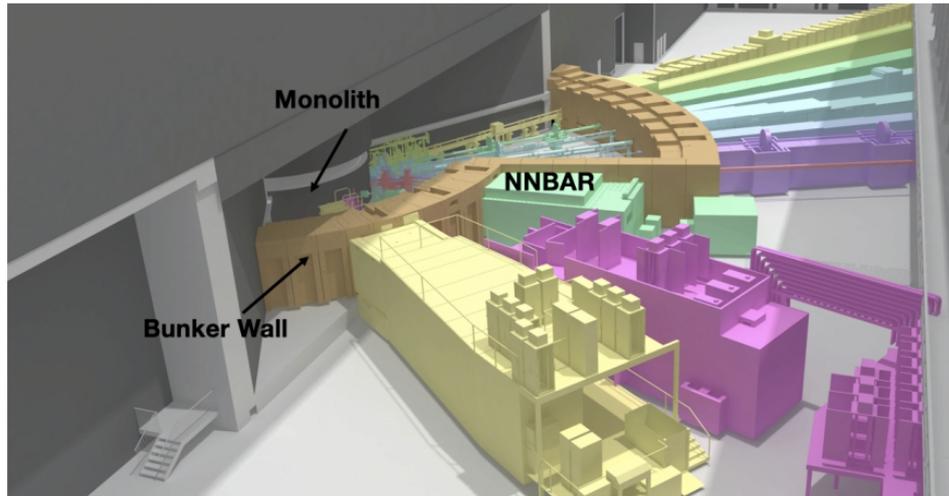


Figure 4: The ESS monolith and bunker area. At the start of ESS operation, the NNBAR location will be occupied by the test beamline, used in the early days of the ESS operation to characterize the target-reflector-moderator system. Also shown in the figure are the caves of the LOKI (purple) and FREIA (yellow) instruments.

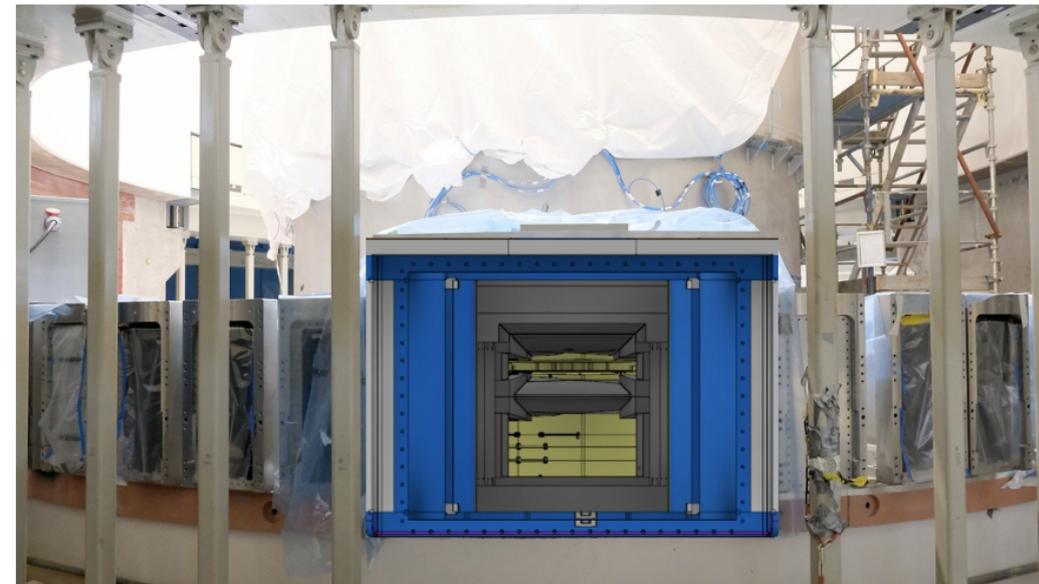


Figure 3: Photograph of the frame of the Large Beam Port being installed in the ESS monolith. A superimposed CAD drawing is showing the field of view of the LBP. The upper moderator, the inner shielding to avoid a direct view of the target, and the space below the target where the high-intensity moderator will be placed, can be clearly seen.

# Ganhos potenciais com relação ao ILL

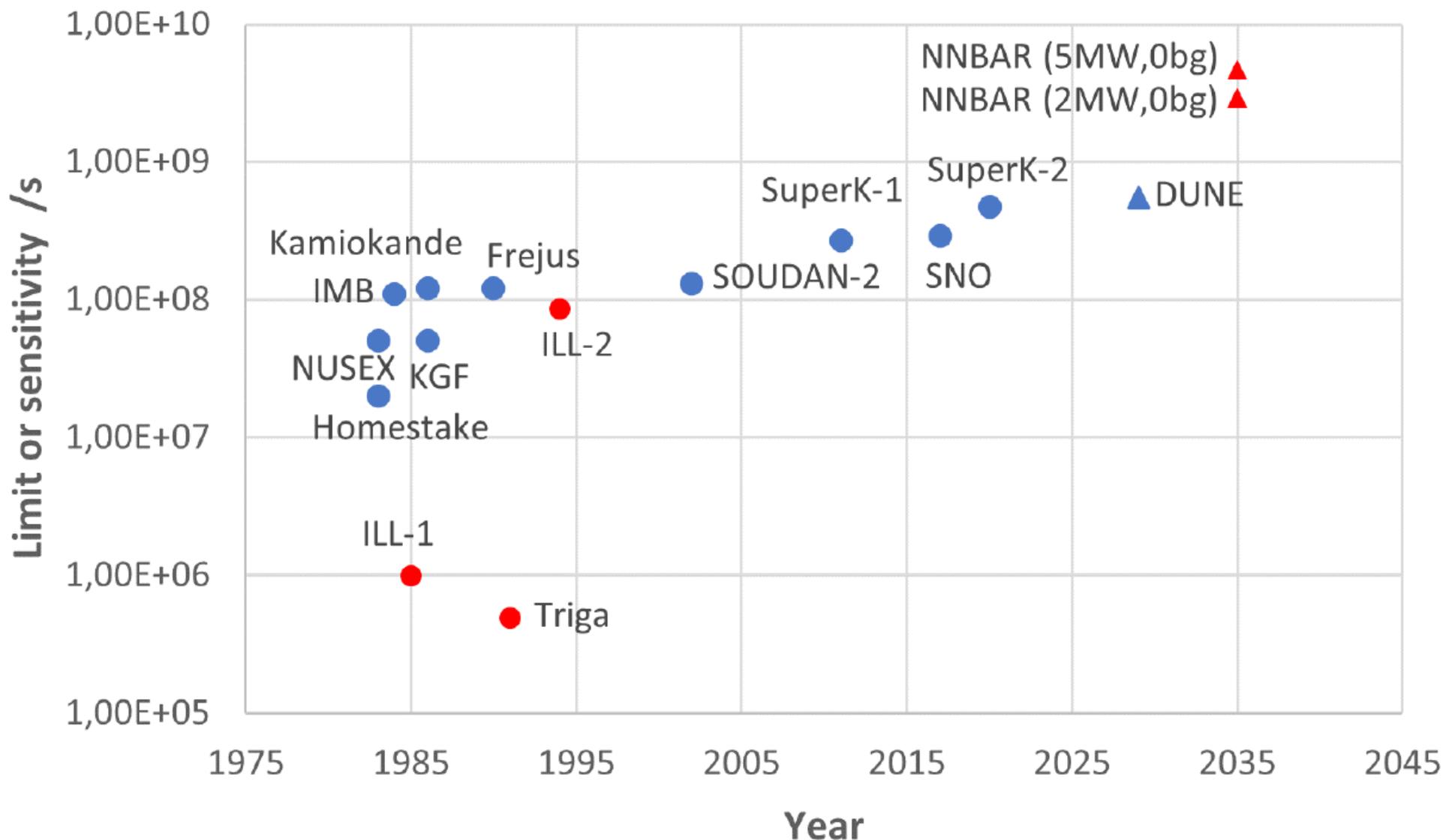
Brightness		$\geq 1$
Moderator Temperature	<TOF> driven by colder neutrons, $\sim$ quadratic ( $t^2$ )	$\geq 1$
Moderator Area	Needs large aperture	2
Angular Acceptance	2D, so quadratic sensitivity	40
Length	Scale with $t^2$ , so $L^2$	5
Run Time	ILL run was 1 year	3
Total		$\geq 1000$

**x 1000 in probability, reach  $\tau \sim 2-3 \times 10^9$  s**



A oportunidade de testar uma simetria global com uma precisão três ordens de magnitude melhor do que a obtida anteriormente é rara!

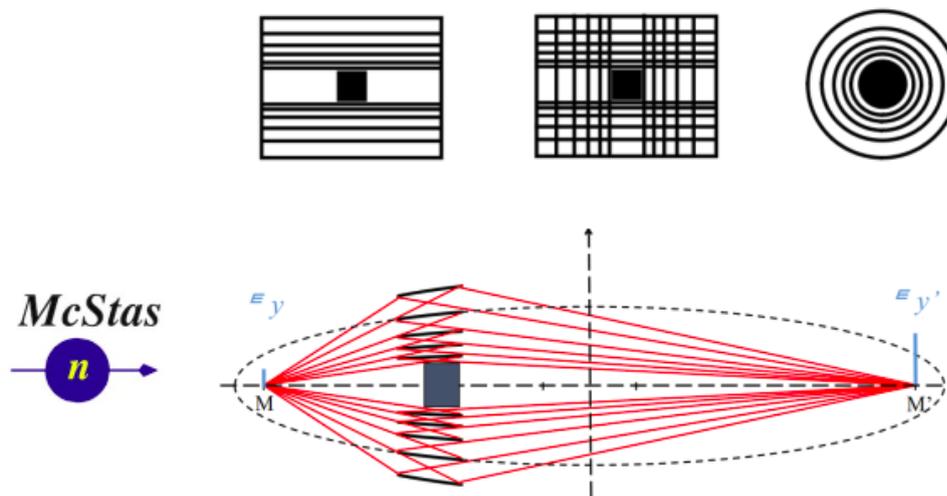
# Comparação com experimentos passados e futuros



# Ótica - NNBAR

# Ótica

- Design of a nested system of neutron mirrors
- Elliptical mirrors (foci located in moderator and detector) in planar or cylindrical arrangement
- McStas Simulations of performance of a given optical system



arXiv:1611.07353  
Journal of Neutron Research 20  
(2018) 91-98

Different optics are compared using the quantity:  $FOM = \sum_i \widehat{N}_i * \widehat{t}_i^2$   
Unit is 1991 experiment

neutrons (uninterrupted) flight time

# Ótica NNBAR

Schematics of ESS Experiment (not in scale)

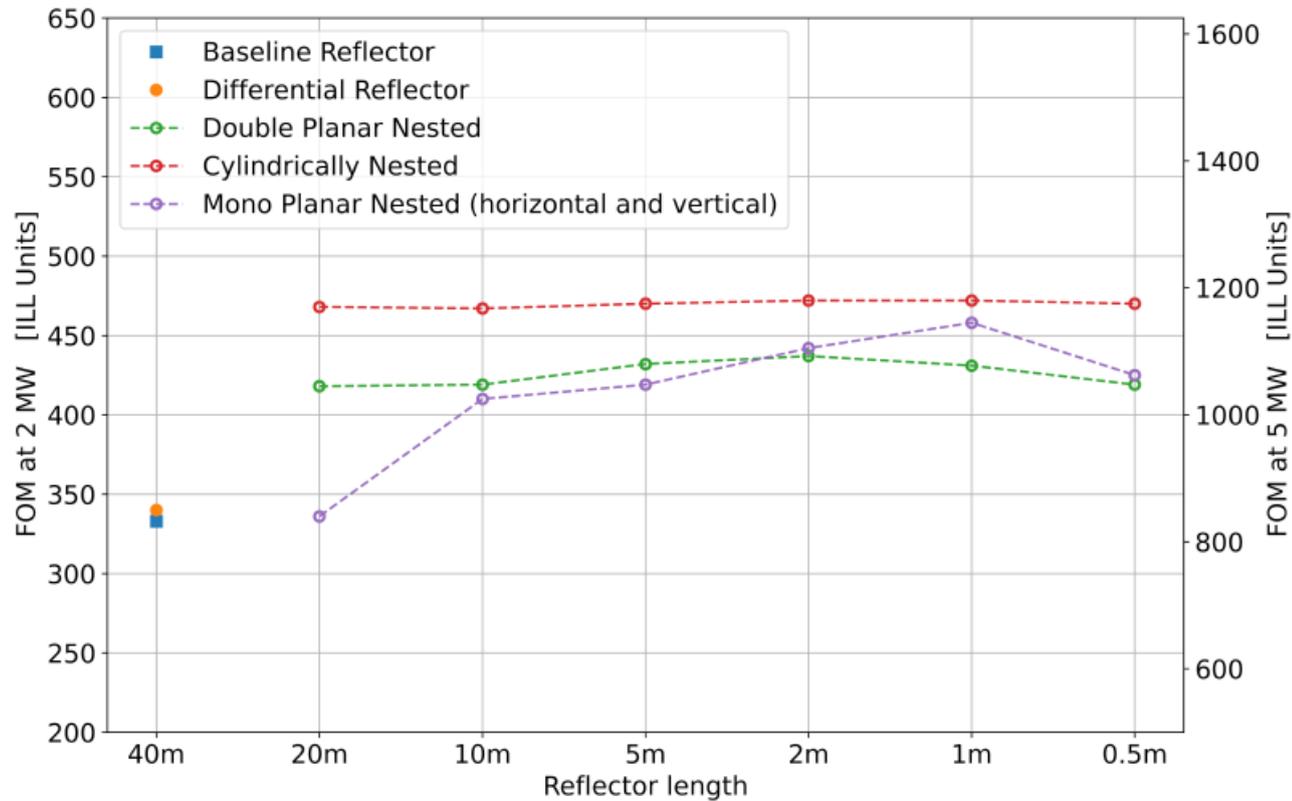
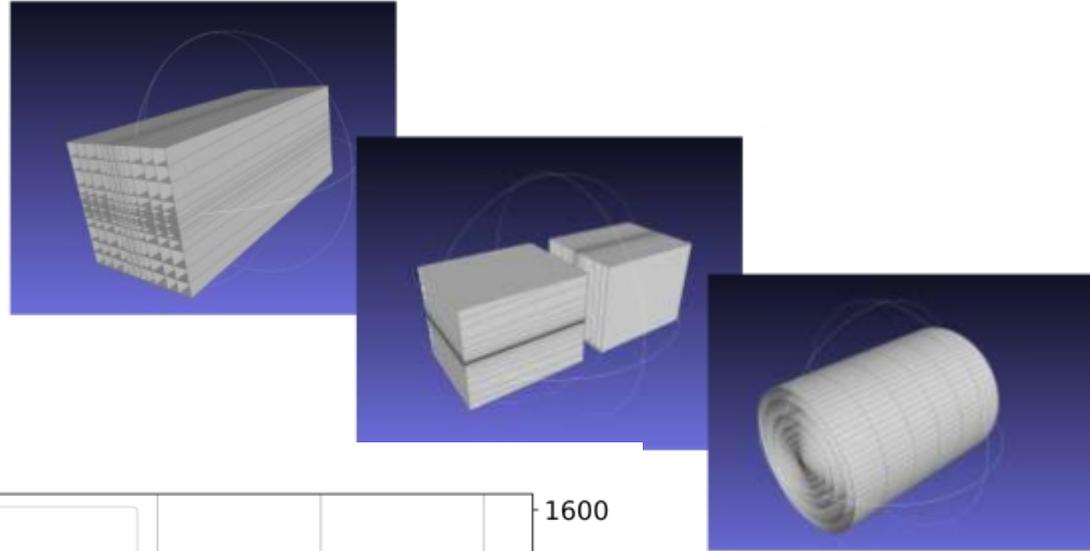
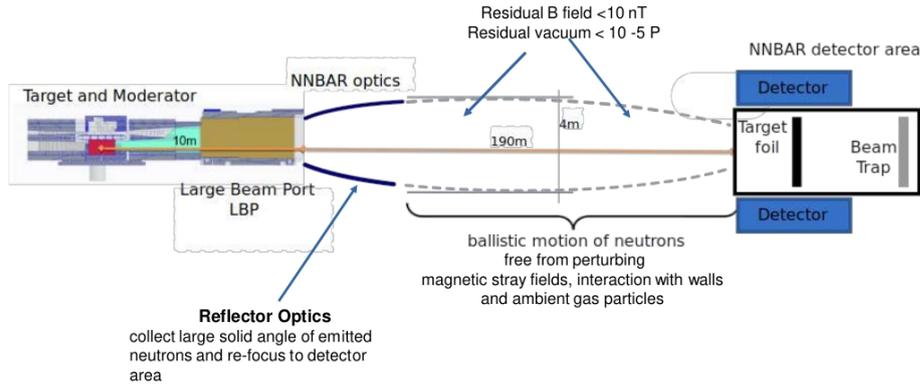
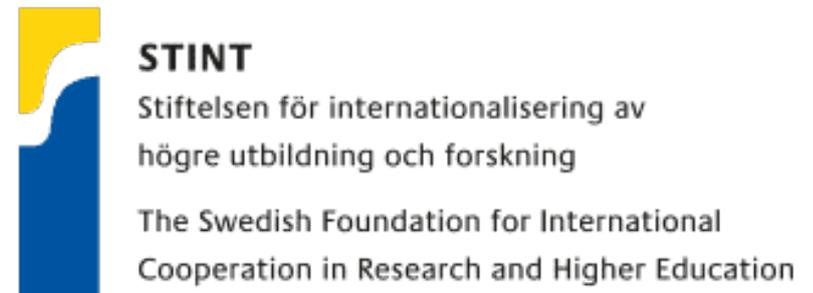


Figure 41: Collected FOMs for different reflector geometries (target power 2 MW and 5 MW, respectively).

# Resumo e perspectivas

- A violação do número bariônico é fundamental para explicar os problemas da cosmologia moderna.
- Uma simetria global accidental que não se espera que seja preservada.
- Normalmente, CNB é quebrada em cenários além do MP.
- Se VNB fosse observada em experimentos de laboratório: Física além do MP!
- Oportunidade fantástica de fazer isso no ESS com participação significativa do Brasil!
- Teste experimental de uma simetria global com melhoria de 3 ordens de magnitude é algo raro.



# Obrigado!

- **Contato: [bernhard.meirose@hep.lu.se](mailto:bernhard.meirose@hep.lu.se)**



**STINT**

Stiftelsen för internationalisering av  
högre utbildning och forskning

The Swedish Foundation for International  
Cooperation in Research and Higher Education



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**Vetenskapsrådet**



**LUNDS**  
UNIVERSITET