

**JINR participation in
the project NA-64
«Search for dark sectors
in missing energy events»**

Отчет и продление проекта

On behalf of the team D.Peshekhonov

NA64 Collaboration (MoU)

Universidad Tecnica Federico Santa Maria (UTFSM), Valparaiso, Chile

S. Kuleshov, W. K. Brooks, H. Hakobyan, S. Kovalenko, G. Vasquez Arenas, P. Ulloa

Rheinische Friedrich-Wilhelms- Universität Bonn, Germany

M. Ball, M. Hösgen, B. Ketzer

Institute for High Energy Physics, Protvino, Russia

S.V. Donskov, V.A. Kachanov, Yu.V. Mikhailov, V.A. Poliakov, V.D. Samoylenko, A.P. Filin.

Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

G.D. Kekelidze, V.Yu. Karjavine, V.A. Kramarenko, V. Lysan, V.A. Matveev, V.V. Myalkovskiy, D.V. Peshekhonov, V.D. Peshekhonov, A.A. Savenkov, I.A. Zhukov

P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (LPI), Moscow, Russia

V.O. Tikhomirov, K. Zhukov

Institute for Nuclear Research of the RAS (INR), Moscow, Russia

A.V. Dermenev, S.N. Gninenko, A.E. Karneyeu, M.M. Kirsanov, N.V. Krasnikov, L.V. Kravchuk, O. Petukhov, I.I. Tkachov, D.A. Tlisov, A.N. Toropin

Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk, Russia

V.E. Burtsev, R.R. Dusaev, V.E. Lyubovitsky, A.Yu. Trifonov, B.I. Vasilishin

ETH Zurich, Institute for Particle Physics, Zurich, Switzerland

D. Banerjee, D.A. Cooke, P. Crivelli, B. Radics, A. Rubbia

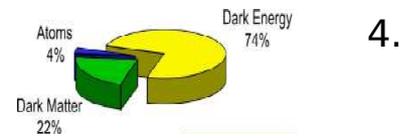
JINR participation

Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

G. Kekelidze (0,4), V. Karjavine (0,1), V. Kramarenko (0,4), V. Lysan (0,8), V. Matveev (0,1), D. Peshekhonov (0,3), A. Savenkov (0,3), I. Zhukov (0,8),
A.Festchenko (0,1), T.Enik (0,2), P.Volkov (0,5), A.Ivanov(0,3), V.Burtsev(0,5),
V.Frolov (0,2)

FTE: 5

Motivation



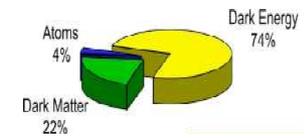
4.

Несмотря на то, что СМ находится в великолепном согласии со всеми проведенными измерениями, она не может считаться полной законченной теорией. Астрофизические и космологические наблюдения, явно свидетельствуют о существовании во Вселенной темной материи (ТМ) и темной энергии, которые составляют примерно 25% и 70% от ее полной массы. Таким образом, СМ описывает фактически только 5% Вселенной, состоящей из обычного вещества.

Интенсивные поиски основных кандидатов на роль ТМ на LHC (SUSY neutralino) и в подземных лабораториях (WIMPs) пока не привели пока к результатам. Только сравнительно недавно было обнаружено, что она движется относительно медленно, т.е. является “холодной”. Тот факт, что основным пробником для изучения ее свойств служит гравитационное взаимодействие является основной проблемой, поэтому, попытки обнаружения нового типа взаимодействия между обычной и ТМ представляются крайне интересными.

Сравнительно недавно было выдвинуто предположение, что ТМ не является простым скоплением частиц одного сорта, а является частью так называемого “скрытого сектора” (Hidden or Dark Sector), состоящего из семейств новых частиц, подобно тому, как устроена видимая часть Вселенной.

Предполагается, что основные (phenomenologically unobjectionable по F. Wilczek) взаимодействия (portals) между Dark Sector и СМ, допускающие построение перенормируемого расширения СМ, могут происходить за счет смешивания а) скалярных полей (Хиггс, F. Wilczek), б) векторных полей (фотон-dark photon, Okun, Glashow) в) нейтрино (right-handed neutrino).



В таком расширении СМ одной из наиболее интересных является модель скрытого сектора, которая по аналогии с обычным электромагнетизмом, рассматривает возможное существование “темного” электромагнетизма. В предлагаемой модели взаимодействие между обычными и скрытыми частицами происходит за счет обмена массивным темным фотоном A' в результате его смешивания с обычным фотоном.

Такая частица могла бы распадаться либо видимым образом на обычные частицы, например, электрон-позитронные пары, либо на более легкие частицы темной материи, которые не детектируются, и тогда такой распад является невидимым.

Существование A' позволило бы объяснить не только ряд астрофизических аномалий & наблюдений, но в том числе объяснить и расхождение между измеренным и вычисленным значением аномального магнитного момента мюона.

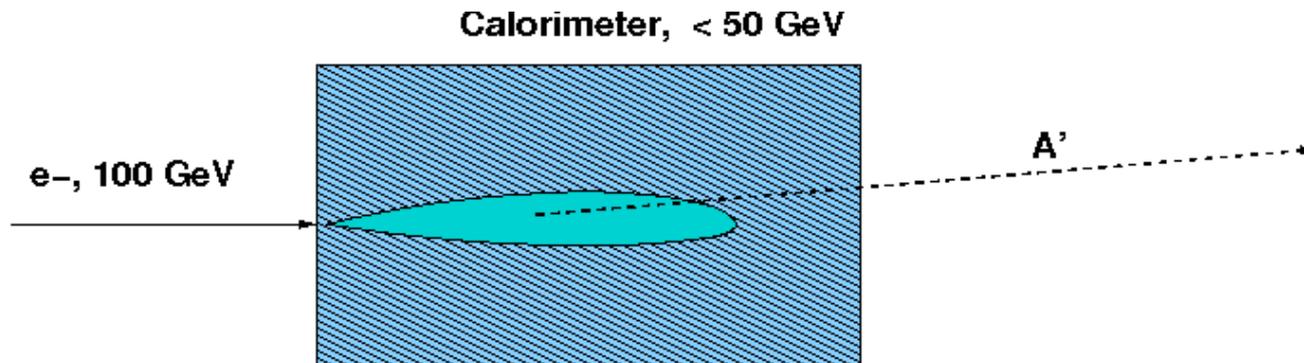
Причина, почему она до сих пор не была обнаружена, может заключаться в том, что:

- а) либо она является достаточно тяжелой, и тогда ее поиски являются важной задачей ЛНС,
- б) она является легкой, с массой меньше 1 ГэВ, и не видна из-за ее слабого взаимодействия.

Тогда поиск таких легких A' можно проводить на ускорителях более низких энергий, в экспериментах с высокой чувствительностью.

Программа исследований на NA64 включает в себя:

- электронный пучок: поиск новых частиц ассоциируемых с темным фотоном;
- мюонный пучок: поиск нового Z' связанного с мюоном и тау лептоном, такой Z' также мог бы объяснить мюонную $g-2$ аномалию.
- Пучки пионов и каонов. Поиск распада $K_L \rightarrow \nu\nu, \phi\phi, \dots$ Поиск распадов $\pi, \eta, \eta', \dots \rightarrow$ invisible.



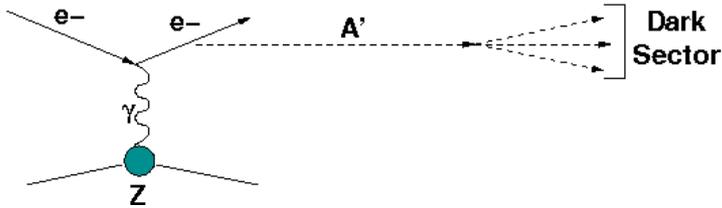
если говорить про электронный пучок, 3 основных требования к постановке эксперимента:

- High quality e- beam: monochromaticity, purity, **intensity**
- e- tagging system: to suppress pion, kaon decays in flight
- Calorimeter **hermeticity**: to avoid energy leak & high quality tracking

Expected sensitivity: single A' event per $10^{10} - 10^{12}$ eot.

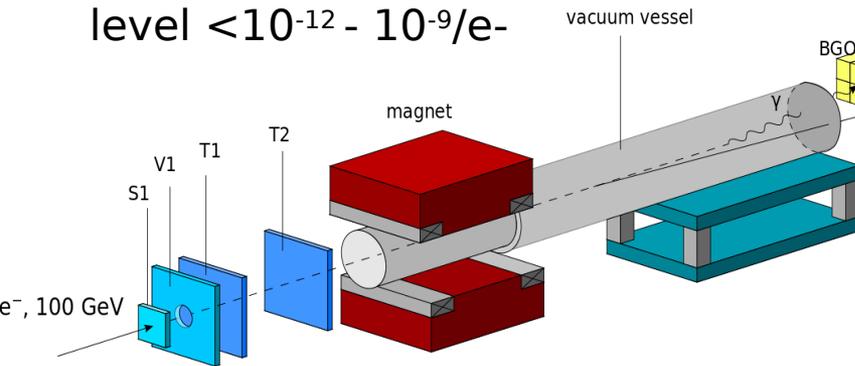
Search for $A' \rightarrow$ invisible decays

Source of A' 's:



Invisible decay of invisible state!

level $< 10^{-12} - 10^{-9}/e$



S.Andreas et al., arXiv: 1312.3309
S.G., PRD(2014)

Main components :

- clean, mono-energ. 100 GeV e^- beam
- e^- tagging system: MM/GEM/Straw tracker + SRD (BGO, LYSO; Pb-SC)
- 4π fully hermetic ECAL+ HCAL

Signature:

- in: 100 GeV e^- track
- out: < 50 GeV e -m shower in ECAL
- no energy in the Veto and HCAL
- Sensitivity $\sim \epsilon^2$

Summary of background sources for $A' \rightarrow$ invisible

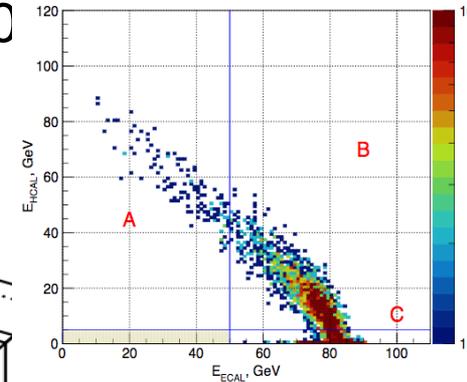
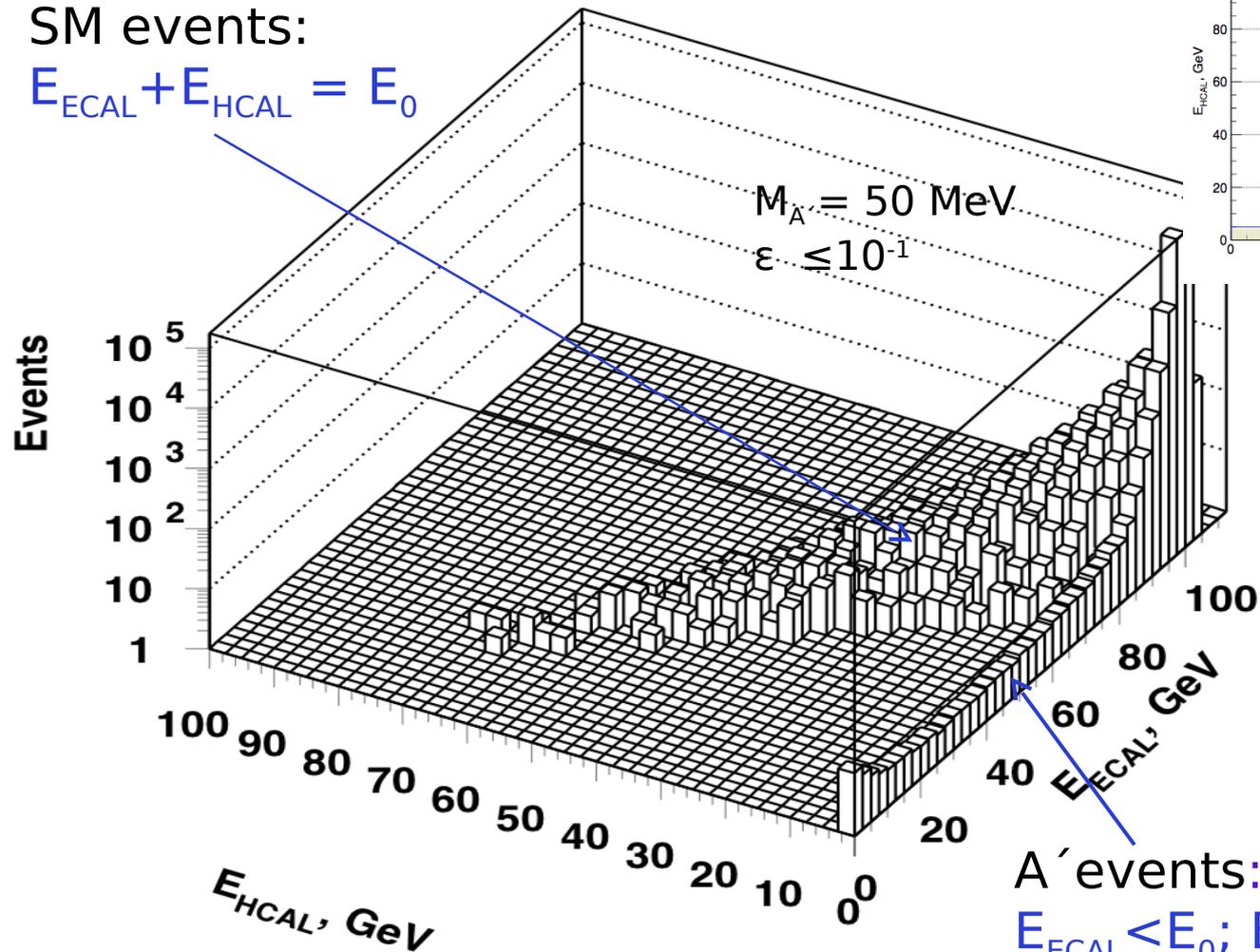
Source	Expected level	Comment
Beam contamination		
- π , ρ , μ reactions and punchthroughs, ... - e^- low energy tail due to brems., π, μ -decays in flight...	$< 10^{-13}$ - 10^{-12} $< 10^{-12}$	Impurity $< 1\%$ high precision MM tracker + e^- SR photon tag
Detector		
ECAL+HCAL energy resolution, transverse hermeticity , holes, dead material, cracks...	$< 10^{-13}$	Full upstream coverage
Physical		
- hadron electroproduction, e.g. $e^- A \rightarrow e^- A^* + n, \pi, \rho, J/\psi$ - - n punchthrough , μ inefficiency - WI process: $e^- Z \rightarrow e^- Z \nu \nu$	$< 10^{-13}$ $< 10^{-13}$	HERA ep-data (H1 Collaboration) WI σ estimated.
Total	$< 10^{-12}$	

Signature for $eZ \rightarrow eZA'$; $A' \rightarrow$ invisible

GEANT4+code for A' emission in the process of e-m shower development $\sigma(eZ \rightarrow eZA')$ from Bjorken et al. '00

SM events:

$$E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}} = E_0$$

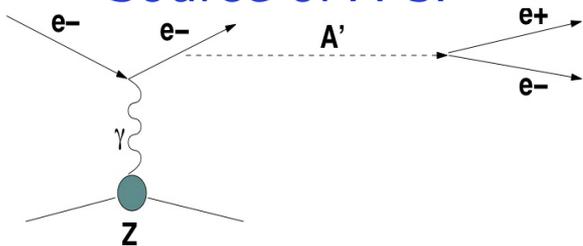


A' events:

$$E_{\text{ECAL}} < E_0; E_{\text{HCAL}} = 0$$

Search for the $A' \rightarrow e^+e^-$ decay

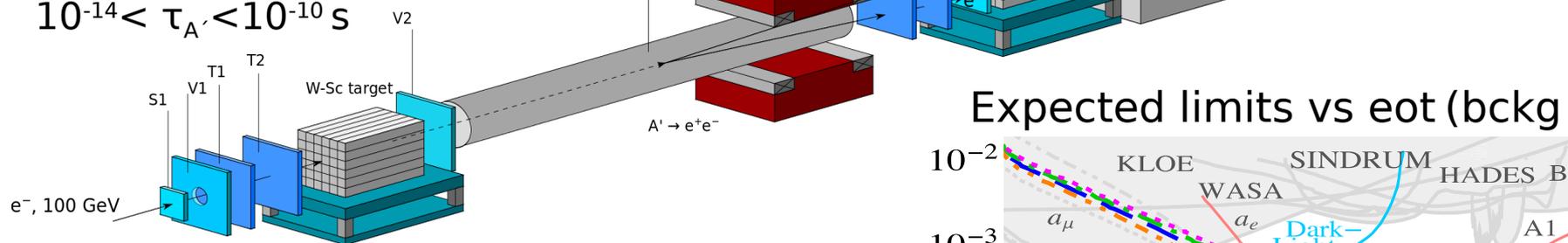
Source of A' 's:



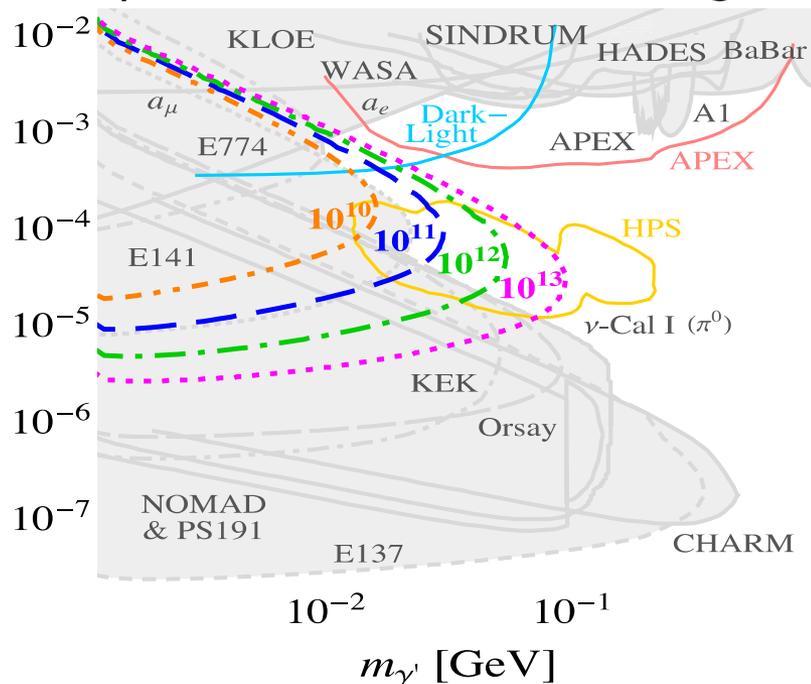
$$\sigma_{A'}/\sigma_{\gamma} \sim 10^{-12} - 10^{-9}$$

$$10^{-14} < \tau_{A'} < 10^{-10} \text{ s}$$

$e^-, 100 \text{ GeV}$



Expected limits vs $e\theta$ (bckg free)



Signature:

- $S = S1 \times \text{Target} \times S2 \times \text{ECAL} \times V2 \times V3 \times \text{HCAL} \times \mu$
two separated showers in target and ECAL from a single e^-
- $E_0 = E_T + E_{\text{ECAL}}$
- magnet to separate e^+e^-
- $\theta_{e^+e^-}$ is small to be resolved

Summary of background sources for $A' \rightarrow e^+e^-$

11.

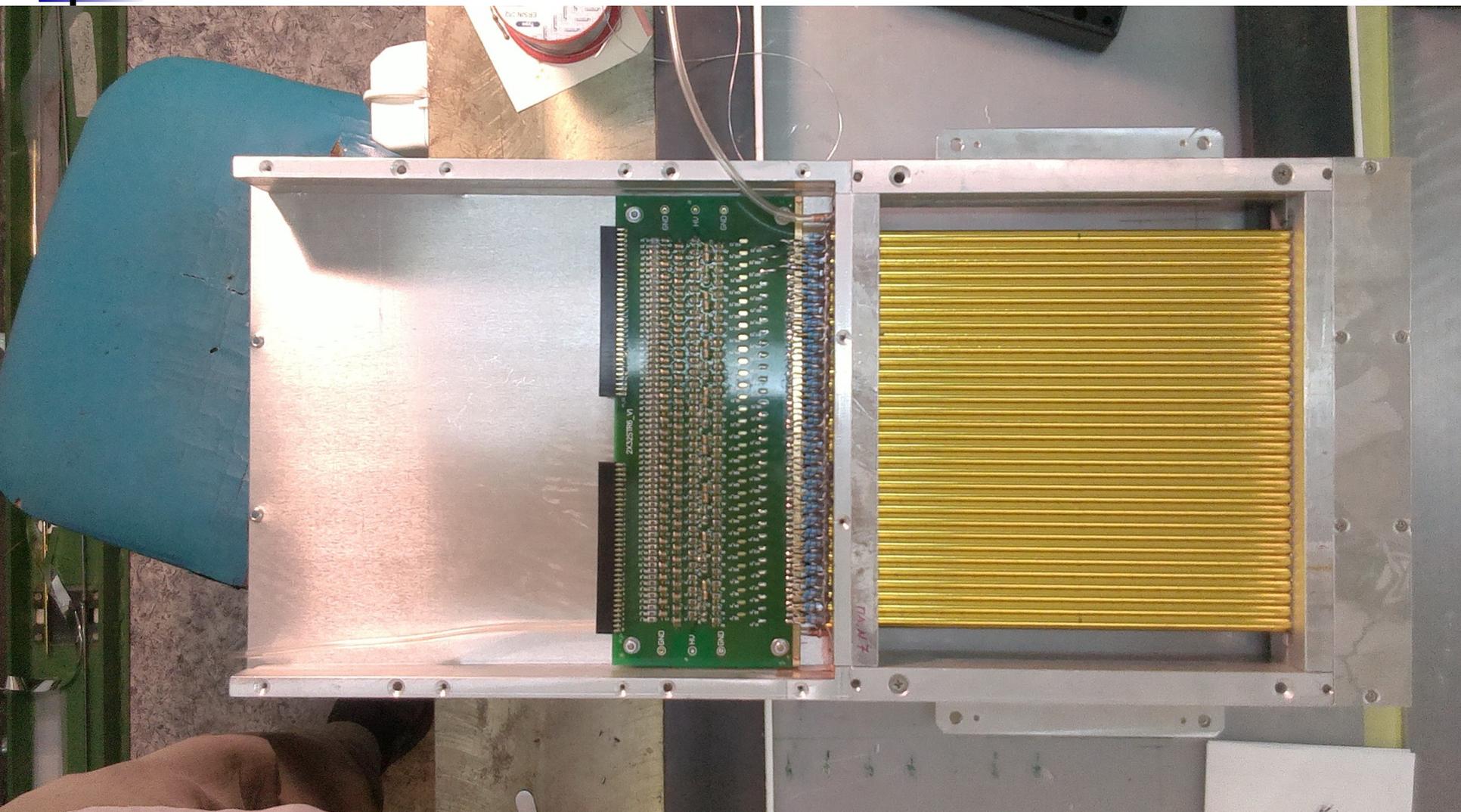
Table 2. Expected contributions from different background sources estimated for the beam energy 100 GeV.

Source of the background	Expected level
punchthrough e^- s or γ s	$\leq 10^{-15}$
hadronic interactions	$\leq 2 \times 10^{-15}$
μ reactions	$\leq 10^{-14}$
accidentals	$\leq 10^{-14}$
Total	$\leq 3 \times 10^{-15}$

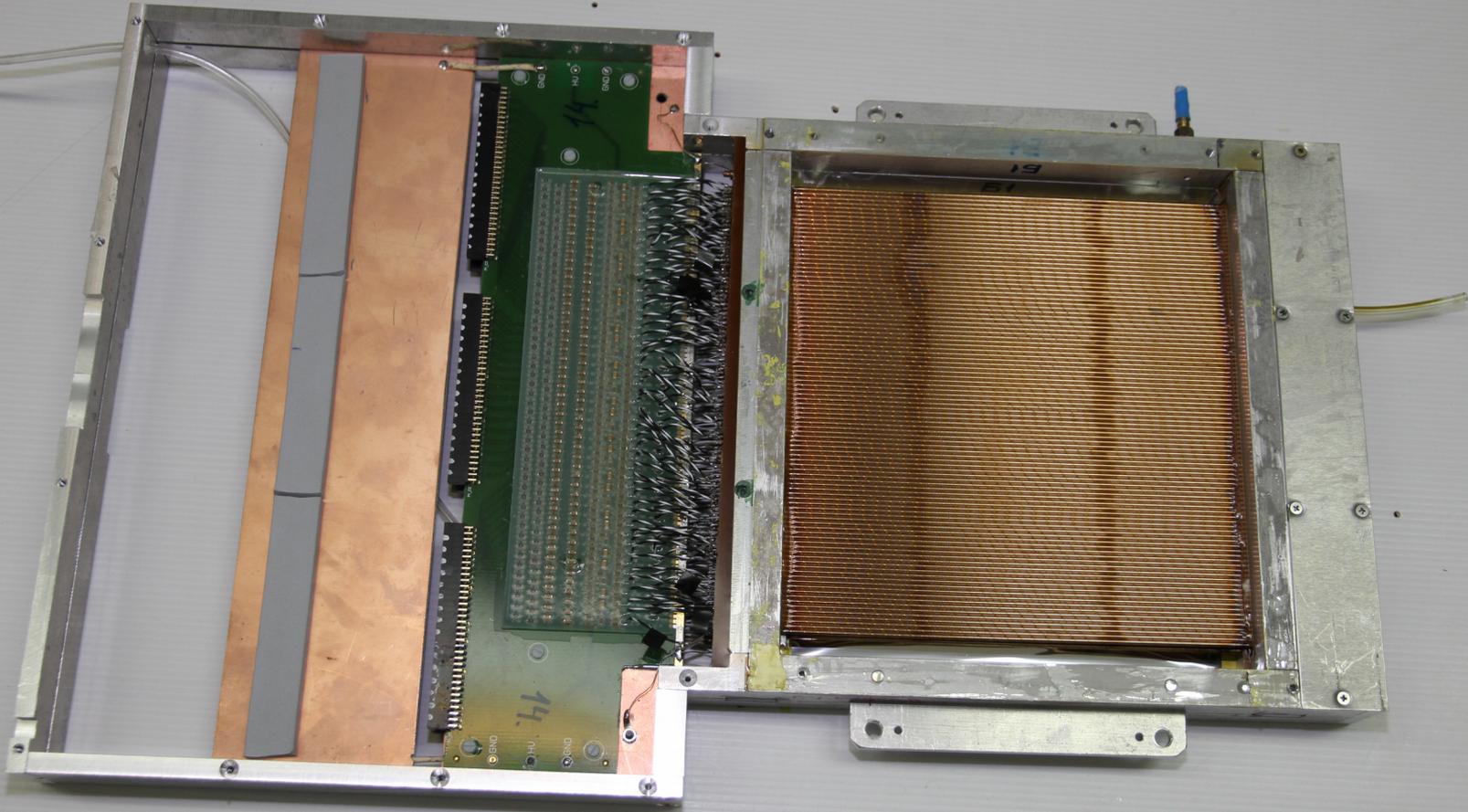
JINR responsibilities

Responsibility	Deliverables	Institutions
Scintillators	Beam trigger counters	IHEP
	Veto counters	IHEP
Beam hodoscopes	Two modules	IHEP, TPU
Tracker system	Micromegas	ETHZ
	Straw tubes	JINR, LPI, SINP MSU
	GEMs	HISKP
ECAL	Preshower, ECAL, Photo-readout, WLS fibers, Trigger modules	IHEP, INR
HCAL	Four Fe-Sc modules, Photo-readout, WLS fibers	IHEP, INR, UTFSM
Synchrotron Radiation detector	BGO Crystals	ETHZ
	LYSO Crystals	UTFSM
	Shashlik	IHEP, INR
Theory	A' and milli-Q production cross-sections, decay rate	INR
Slow control	Centralized slow control	IHEP, INR, all
DAQ	DAQ modules	IHEP, all
Electronics	Modules	All

6mm straw (double layer, 64ch)



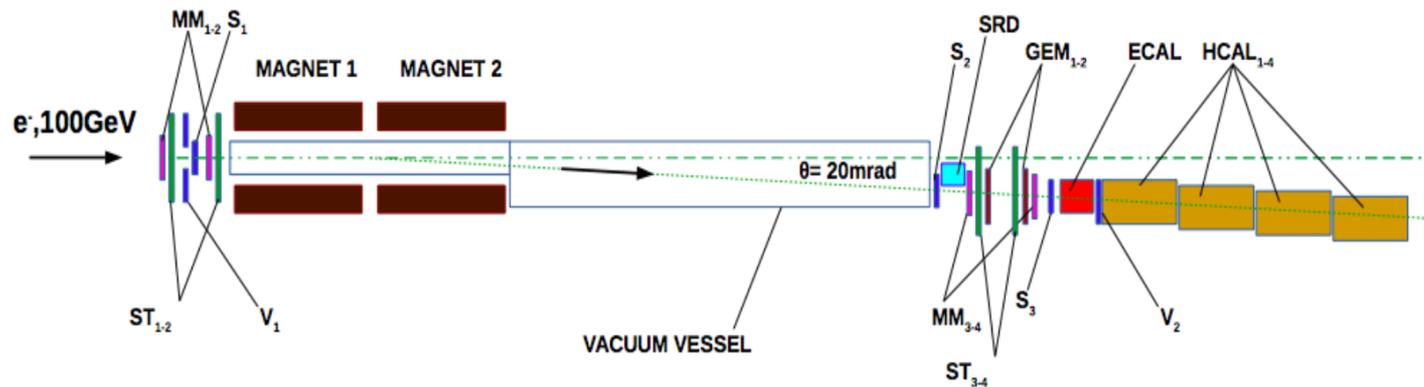
2mm straw (double layer, 192ch)



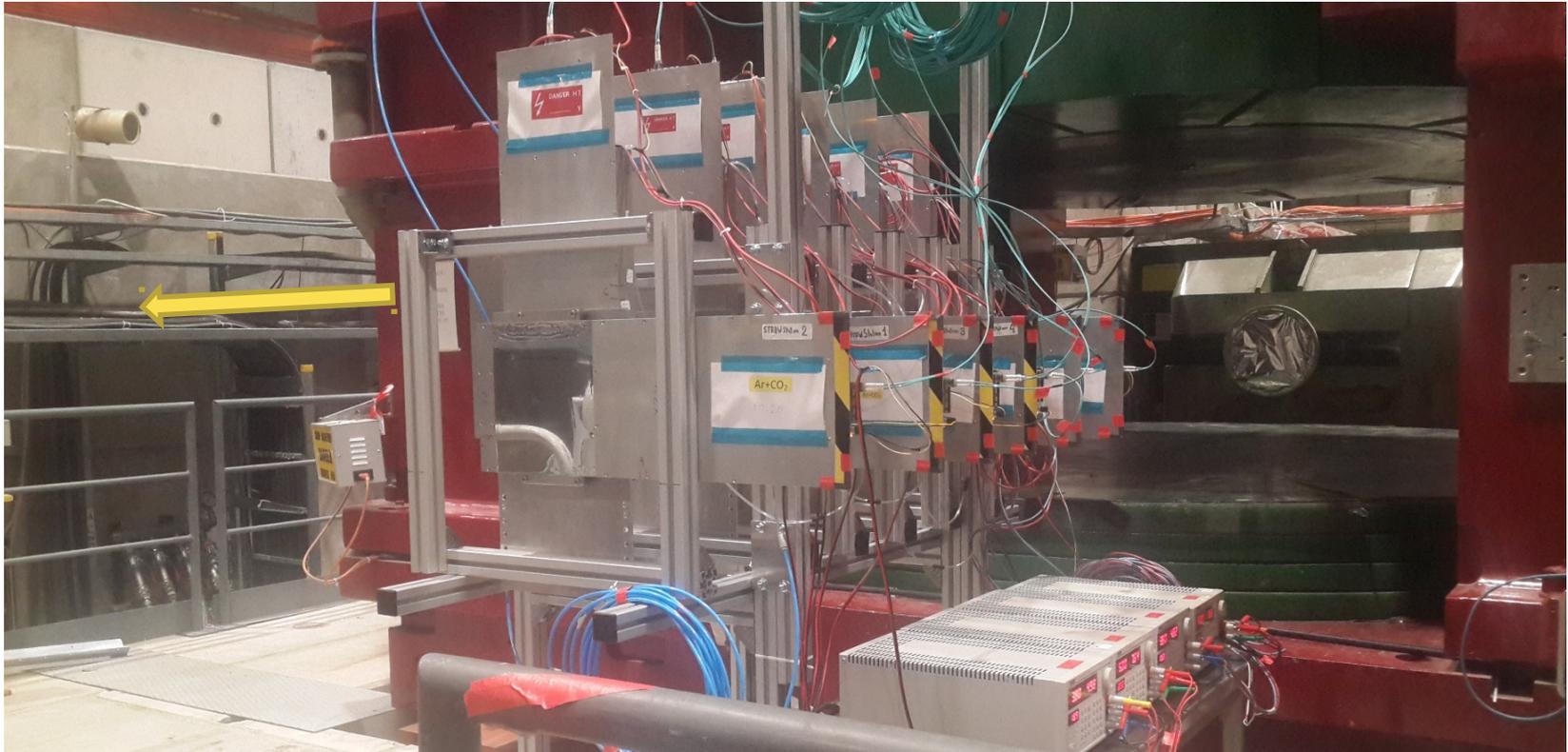
NA-64 setup



TOP VIEW



11 мая 2018 начало работы на канале NA64
 Установлены все 6 станций на пучке.
 Все камеры смонтированы на одной подставке для настройки



Номер прошивки: 10.152.72. ...													
	126	127	124	125	122	123	120	121	118	119	116	117	108
Beam ---->	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	T0
# порта мультипл	1	0	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	12
	ST2		ST1		ST3		ST4						

Achieved results

The data from years 2016 and 2017 have been processed and published, the total statistics is $\sim 10^{11}$ events, candidates for the signal corresponding to the signature of the dark photon have not been detected.

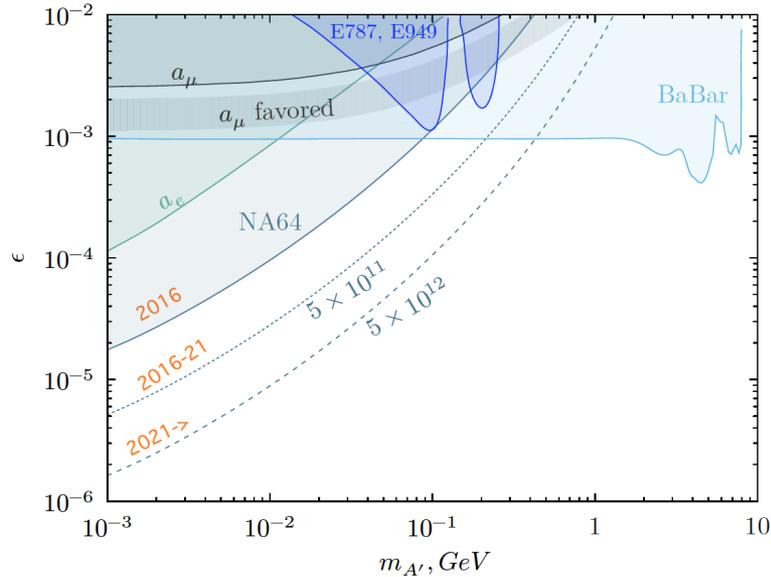
Part of the year 2017 run was devoted to the search for a new hypothetical X-boson with the mass of 16.7 MeV, the existence of which could explain the result on the anomalous production of e^+e^- pairs in the decay of the excited state $^8\text{Be}^*$ obtained in the ATOMKI experiment. 5.4×10^{10} events were taken, hypothetical boson was not found, obtained data allowed to significantly increase the limit on the coupling constant of the X-boson with an electron, as well as on the mixing parameter of the A' with the conventional photon.

During the run in 2018 an amount of 2×10^{11} events were taken in a search for the invisible mode and 3×10^{10} - for the visible one, data are being analyzed.

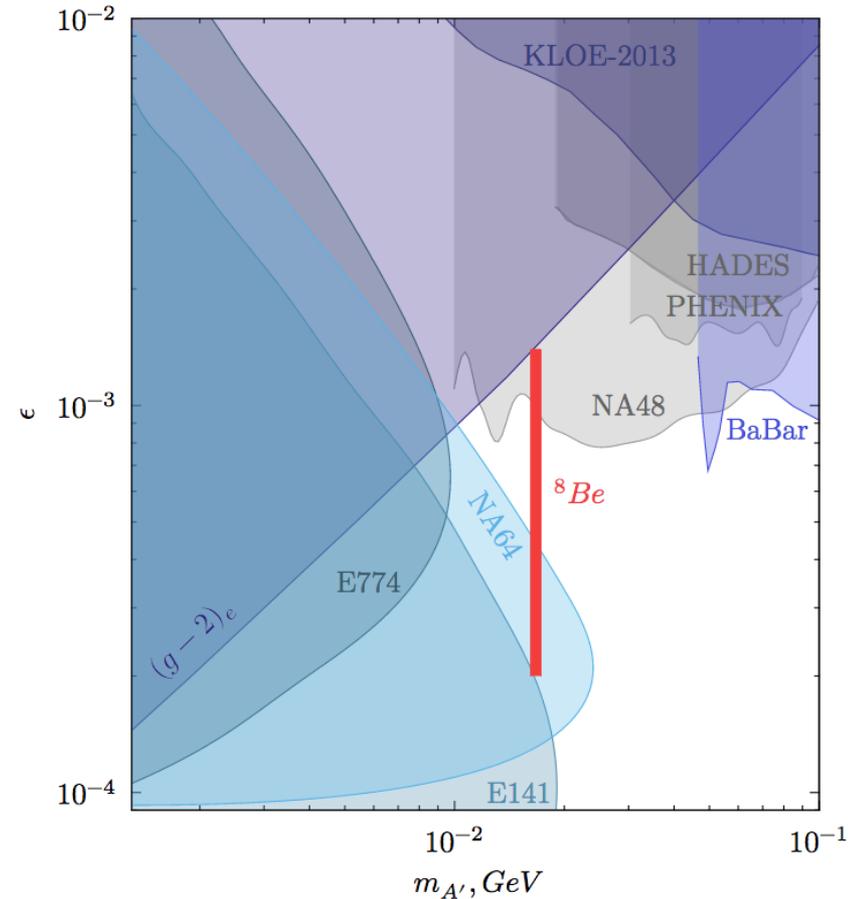
The permanent experimental zone at CERN on the H4 channel was allocated for the experiment. Preparatory works on its arrangement started.

The facility should be upgraded for more efficient operation with a high beam intensity and be prepared for the 2021 run, during which it is planned to increase significantly the statistics by registering more than 5×10^{11} events for further searches for A' and X-boson decays.

Results from 2016 and beyond: kinetic mixing ϵ



S.N. Gninenko – NA64 Status Report, SPSC Open Meeting, CERN, June 7–8, 2018



Search for invisible decays of sub-GeV dark photons in missing-energy events at the CERN SPS, NA64, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 011802

Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode, NA64 collaboration, Phys.Rev. D 97 (2018) 072002;

Beams and running time

Beam	Energy, GeV	Intensity per spill	Period, months	N_{tot}	Process
e^-	~ 100	$\sim 10^6$	~ 6 ~ 6	$\sim 10^{12}$ $\sim 10^{12}$	$eZ \rightarrow eZA'$; $A' \rightarrow \text{inv}$ $A' \rightarrow ee$
μ^-	~ 150	$\sim 10^6$	~ 6	$10^{12} - 10^{13}$	$\mu Z \rightarrow \mu ZZ'$, $Z' \rightarrow \nu\nu$ $\mu Z \rightarrow \tau Z$ $\tau \rightarrow \mu\nu\nu$
π^-	$\sim 20-50$	$\sim 10^6$	~ 6	$10^{12} - 10^{13}$	$\pi A \rightarrow \pi^0, \eta, \eta' A$ $\pi^0, \eta, \eta' \rightarrow \text{inv}$
K^-	$\sim 20-50$	$\sim 10^6$	~ 6	$\sim 10^{12}$	$KA \rightarrow K^0 A$ $K_S, K_L \rightarrow \text{inv}$
p	200-400	$\sim 10^6$	~ 6	$\sim 10^{11}$	$pA \rightarrow pAZ'$ $Z' \rightarrow \chi\chi$

МЮОННЫЙ ПУЧОК

Proposal for an experiment to search for dark sector particles weakly coupled to muon at the SPS

D. Banerjee^k, J. Bernhard^d, V.E. Burtsev^j, A.G. Chumakov^j, P. Crivelli^m, E. Depero^m, A.V. Dermenev^e, S.V. Donskovⁱ, R. Dusaev^j, T. Enik^b, V. Frolov^b, A. Gardikiotis^h, S.N. Gninenko^e, M. Hösgen^a, A. Karneyeu^e, G.D. Kekelidze^b, B. Ketzer^a, D. Kirpichnikov^e, M.M. Kirsanov^e, S. Kovalenko^l, L.V. Kravchuk^e, V.A. Kramarenko^{b,g}, N.V. Krasnikov^e, S.V. Kuleshov^l, V.E. Lyubovitskij^{j,l}, V.M. Lysan^b, V.A. Matveev^b, Yu.V. Mikhailovⁱ, L. Molina-Bueno^m, D.V. Peshekhonov^b, V.A. Polyakovⁱ, B. Radics^m, A. Rubbia^m, V. Samoilenkoⁱ, D. Shchukin^f, V.O. Tikhomirov^f, D.A. Tliso^e, A.N. Toropin^e, A. Yu. Trifonov^j, P. Ulloa^l, B.I. Vasilishin^j, B.M. Veit^d, P.V. Volkov^{b,g}, and V.Yu. Volkov^g

4 The experiment to search for the $Z_\mu \rightarrow invisible$ decays

The experiment can to perform in two Phases:

- The main goal of the Phase 1 is to probe the muon $(g - 2)_\mu$ parameter space, which would require accumulation of $\lesssim 10^{11}$ muons on target (MOT)
- The main goal of the Phase 2 is to cover the DM parameter space by collecting $\gtrsim 10^{13}$ MOT.

Мюонный пучок

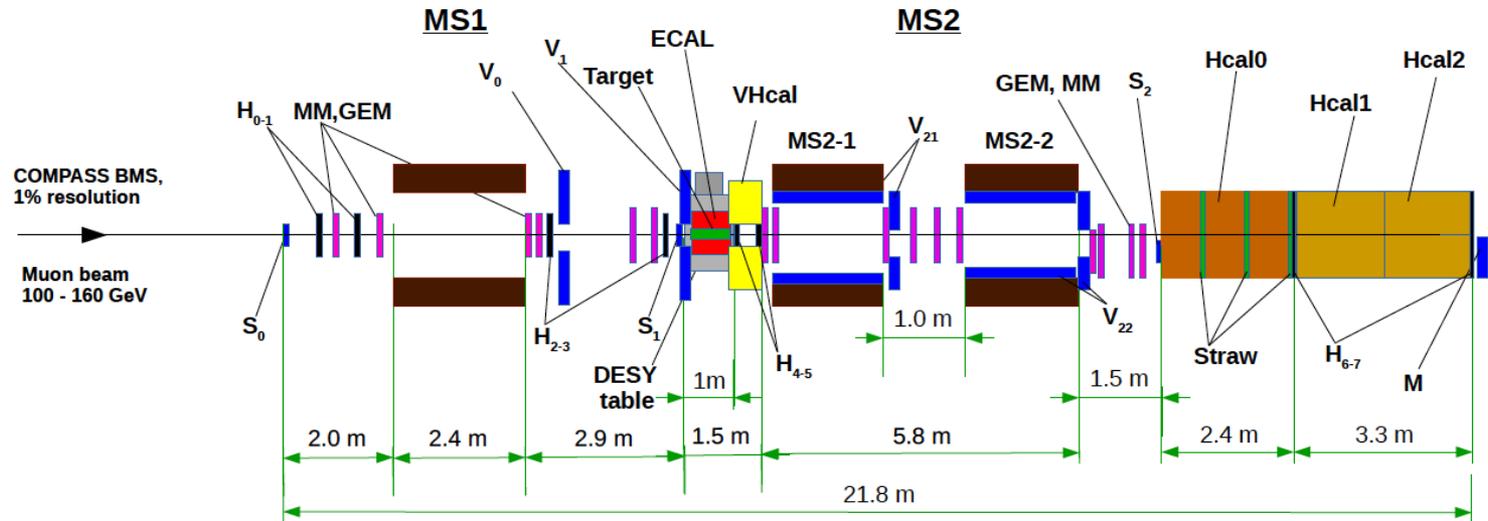


Figure 4. Schematic illustration of the setup to search for dark Z_μ . The bremsstrahlung Z_μ s are produced in the forward direction in the reaction $\mu + Z \rightarrow \mu + Z + Z_\mu$ of a high-energy muon scattering off nuclei of an active target (see text for definition of colors).

The method of the search is as follows. The bremsstrahlung Z_μ s are produced in the reaction (3.1) which occurs uniformly over the length of the target (T). A fraction (f) of the primary beam energy $E'_\mu = fE_\mu$ is carried away by the scattered muon which is detected by the second magnetic spectrometer, as shown in Fig. 4, tuned for the scattered muon momentum $p'_\mu \lesssim fp_\mu$. The remaining part of the primary muon energy $(1-f)E_\mu$ is carried away beyond all the subdetectors by the neutrinos from the prompt $Z_\mu \rightarrow \nu\nu$ decay resulting in the missing energy $E_{miss} = E_\mu - E'_\mu$.

Summary

- Установка NA64 на электронном канале SPS введена в эксплуатацию;
- Первая фаза научной программы эксперимента успешно начата; группа ОИЯИ выполняет обязательства по трековой системе на основе **строу трубок**: созданы и введены в эксплуатацию детекторы, созданы стенды в ОИЯИ и ЦЕРН, мат.обеспечение для онлайн мониторинга и сбора данных, В.Фролов основной эксперт по **DAQ**, новые участники (НИИЯФ МГУ, НИИ ЯП БГУ, Томск);
- ЦЕРН одобрил продолжение программы на 2021-2023 на е-пучке, эксперимент получил постоянное место (инвестиции ЦЕРН 400к SFr);
- На совместной сессии ПКК по ФЧ и ЯФ (январь 2019 г) участие ОИЯИ в проекте получило поддержку независимых рецензентов обоих ПКК и было одобрено.

Summary

- Для развития установки на электронном канале и продолжения программы на мюонном пучке SPSC группа ОИЯИ готова принять ответственность за создание 7 двухслойных камер 6мм строу размером 1200x600 мм² и соотв. электроники для них (НИИ ЯП БГУ);
- В рамках физической программы проекта в SPSC подано предложение о начале в 2021 г исследований на мюонном пучке. SPSC рассматривает возможность проведения трех 4-х недельных сеансов на период 2021-2023 гг;

Просим поддержать продолжение участия ОИЯИ в проекте NA64 (тема 02-1-1096), в том числе новые обязательства по развитию трековой системы, на период 2020-2022 гг с первым приоритетом.

Код ОКПО 01797319



БЕЛАРУСКІ ДЗЯРЖАЎНЫ
УНІВЕРСІТЭТ

НАУКОВА-ДАСЛЕДЧАЯ ўСТАНОВА
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ
БЕЛАРУСКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА УНІВЕРСІТЭТА
(НИИ ЯП БГУ)

ул. Бабруйская, д. 11, 220030, г. Минск, Беларусь
тэл.: +375 17 2264231 факс: +375 17 2265124
Электронная пошта: inp-director@inp.bsu.by

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
(НИИ ЯП БГУ)

ул. Бобруйская, д. 11, 220030, г. Минск, Беларусь
тел.: +375 17 2264231 факс: +375 17 2265124
Электронная почта: inp-director@inp.bsu.by

05.03.2018 № 01-23/1038

на _____ от _____

[_____]

Участие в проекте NA64

Директору ОИЯИ
академику В.А. Матвееву

141980, ул. Жоліо-Кюри 6, г. Дубна,
Московская обл., РФ

Ф.В. Мещехову
Кратко подготовить
А. Кош

Уважаемый Виктор Анатольевич!

Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета выражает заинтересованность в участии в проекте NA64, как в расширении электронной его части, так и в создании мюонной.

С 2012 года НИИ ЯП БГУ года принимает активное участие в разработке front-end электроники для современных straw детекторов, создаваемых в ОИЯИ. Работы выполняются в рамках контрактов с ЛФВЭ ОИЯИ. В НИИ ЯП БГУ разработаны и изготовлены специализированные интегральные микросхемы AST-1-1 для перспективных straw детекторов экспериментов CBM, NICA-SPD, NA64. На базе микросхем AST-1-1 разработаны и изготовлены 32-канальные платы накамерной front-end электроники для straw детекторов экспериментов NA64 и BM@N, которые прошли успешное тестирование в ЦЕРН на электронном канале SPS в составе straw детектора эксперимента NA64. Сигналы с плат накамерной front-end считывались специально разработанными и изготовленными 32 канальными платами накамерных TDC, выполненными на базе FPGA. Платы front-end электроники и TDC образуют комплект электроники считывания для straw детекторов.

НИИ ЯП БГУ заинтересован в совместной работе по разработке и изготовлению накамерной электроники считывания (front-end и TDC) для straw детекторов NA64. Предполагается, что совместные работы по созданию электроники считывания для NA64 будут выполняться за счет взноса РБ в ОИЯИ.

Просим включить НИИ ЯП БГУ в дополнение (Addendum) к Memorandum of Understanding (MOU) от ОИЯИ. В приложении к письму указаны участники проекта от НИИ ЯП БГУ, common и constructional вклады по годам.

С уважением,
директор
профессор

Приложение к письму на 1 листе.

Подготовил:
с.н.с. Солин А.В.
м.т. +375297546529

С.А. Максименко

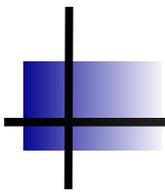


Required resources

	Units of measure	Resource requirements for 2020-2022	Laboratory resources		
			1 st year	2 nd year	3 rd year
Basic units and equipment:	Gas system, electronics (FEE), DAQ, detectors				
Required resources:					
a) OOЭП of the Laboratory	standard hour				
б) Design department of the laboratory	standard hour				
в) Accelerator	hour				
г) Reactor	hour				
д) Computer	hour				
Operating costs	thousand US\$				
Funding source:					
Budget expenditures	thousand US\$	360	145	130	85
Including foreign funds	thousand US\$	105	50	45	10
Contributions of collaborators	thousand US\$				
Grant contributions (INTAS+MHTI)	thousand US\$				
Contributions of sponsors	thousand US\$				
Contributions according agreements	thousand US\$				
Other sources	thousand US\$				

Required resources

N	Purpose of expenses	1 st year	2 ^d year	3 ^d year	Full cost
	Direct expenses				
	Accelerator				
	Design bureau				
	Computing				
	Materials	45	45	10	100
	Equipment	45	30	20	95
	Collaboration funds	15	15	15	45
	Contracts for R&D				
	Business trips	40	40	40	120
	a) non-rouble zone	40	40	40	120
	б) rouble zone				
	в) by protocols				
	Total:	145	130	85	360
		50*	45*	10*	105*



Thank you

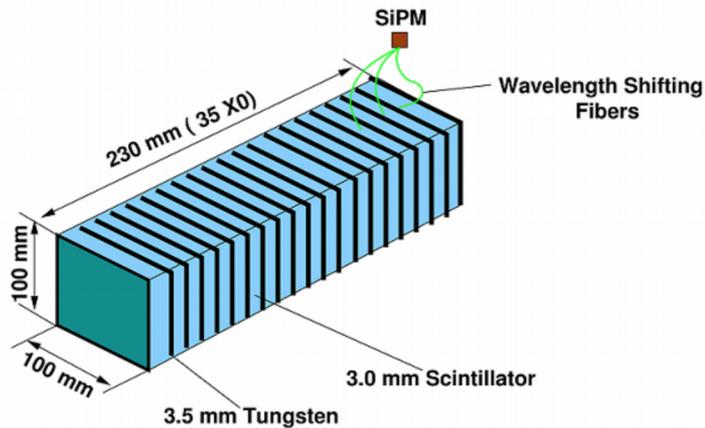


Figure 6. Schematic illustration of a scintillator-fiber-tungsten module consisting of a stack of tungsten and scintillator plates of the size 3.5 mm and 3 mm, respectively. Wavelength shifting fibers pass laterally through the plates and are read out at the side of the module with either SiPMs or APDs photodetector. The similar module with a lateral 2x2 (or 3x3) cells segmentation is also under design.

➤ Longitudinal segmentation	→ 4 modules
➤ Energy range	→ 0.5÷120 GeV
➤ Energy resolution	→ 65%/√E + 6%
➤ Full energy deposition, thickness	→ ~ 28 λ
➤ No crack, uniformity	→ 2÷3%
➤ Module size	→ 60x60 cm ²
➤ Module length	→ 150 cm
➤ Number cells per modules	→ 9
➤ Cell size	→ 192x194 mm ²
➤ Read out	→ PMT, FEU-84-3

1. Electromagnetic calorimeters ECAL + Preshower

- module design: (1.5 mm Pb + 1.5 mm Sc) × 150 layers
- purpose: energy measurements, shower profile measurements, e/π separation
- performance: energy resolution $\Delta E/E \simeq 0.18/\sqrt{E}$, X,Y resolution $\simeq 3$ mm, $e/\pi \lesssim 10^{-2}$
- event rate: up to $10^6 e^-$ per spill, $10^{12} - 10^{13} e^-$ in total run

2. Hadronic Calorimeter HCAL, 4 modules

- module design: (25 mm Fe+ 4 mm Sc) × 48 layers
- purpose: secondary energy detection, π, p, n detection
- performance: energy resolution $\Delta E/E \simeq 0.62/\sqrt{E}$, π -hermeticity $\simeq 10^{-9}$
- event rate: up to $10^6 \pi$ per spill, $10^{10} - 10^{11}$ in total run

3. Beam counters S1,S2 and Hodoscopes H1,H2

- design: Sc 1mm hodoscopes
- purpose: e^-e^+ pair hits, track detection and T_0
- performance: spacial resolution $\simeq 1$ mm, 2 tracks separation $\Delta R \gtrsim 1$ mm
- event rate: up to $10^6 e^-$ per spill

4. Veto counter

- design: plastic scintillator, 5 cm x 60x 60 cm³
- purpose: low energy charged track detection
- performance: mip inefficiency $\lesssim 10^{-3}$
- event rate: up to 10^5 hits per spill

5. Synchrotron radiation counter, BGO array

- design: diam 60x200 mm thick BGO crystal
- purpose: γ ray energy measurements in the range 1-30 MeV
- performance: energy resolution $\Delta E/E \simeq 3\%$ at 1 MeV, time resolution $\simeq 2$ ns.
- event rate: up to 10^6 1-30 MeV γ per spill, $\simeq 10^{11}$ for full run

6. Decay volume

- design: diameter $\simeq 30$ cm × 15 m length, filled with He or vacuum $\lesssim 10^{-5}$ Torr
- purpose: minimize secondary particles interactions

7. Micromegas tracker, 4 chambers

- design: diam 80 mm
- purpose: e- track measurement
- performance: momentum resolution at 100 GeV $\Delta P/P \simeq 2\%$.
- event rate: up to a few 10^5 per spill

8. Straw tube chambers, 4 chambers

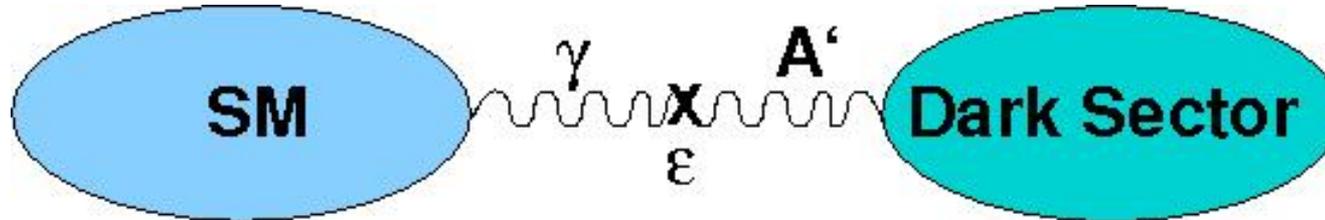
- design: 200x200 mm², thickness $\simeq 200 \mu\text{m}$ thick, straw tube diameter 2 and 6 mm
- purpose: e- track measurement
- performance: momentum resolution at 100 GeV $\Delta P/P \simeq 2\%$.
- event rate: up to 10^6 per spill

Physics prospects (<http://na64.web.cern.ch>)

Process	New Physics	Sensitivity
1. $e^-Z \rightarrow e^-Z + E_{\text{miss}}$		
<ul style="list-style-type: none"> ◇ $A' \rightarrow e^+e^-$ ◇ $A' \rightarrow$ invisible ◇ alps ◇ milli-q 	Dark Sectors: Dark Photons and DM $(g-2)_\mu$ new particles, Charge Quantization	$10^{-3} < \epsilon < 10^{-6}$ $M_{A'} \sim \text{sub-GeV}$ $e' < 10^{-5}-10^{-7}$
2. $\mu^-Z \rightarrow \mu^-Z + E_{\text{miss}}$		
<ul style="list-style-type: none"> ◇ $Z_\mu \rightarrow \nu\nu, \mu^+\mu^-$ ◇ $\mu \rightarrow \tau$ conversion 	New gauged symmetry $L_\mu-L_\tau$ and leptonic forces LFV	$\alpha_\mu < 10^{-11}-10^{-9}$ $\sigma < 10^{-9}-10^{-8}/\mu$
3. $\pi(K)p \rightarrow M^0n + E_{\text{miss}}$		
<ul style="list-style-type: none"> ◇ $K_L \rightarrow$ invisible ◇ $K_S \rightarrow$ invisible ◇ $\pi^0, \eta, \eta \rightarrow$ invisible 	CP, CPT symmetry B-S Unitarity, new particles: NHL, $\phi\phi, VV$	$\text{Br} < 10^{-8}-10^{-6}$, comple- mentary to $K \rightarrow \pi\nu\nu$ $\text{Br} < 10^{-8}-10^{-7}$
4. $pA \rightarrow X + E_{\text{miss}}$		
<ul style="list-style-type: none"> ◇ leptophobic X 	$\sim \text{GeV DM}$	$\sigma < 10^{-7}-10^{-8} / p$

dark mediator A'

Holdom'86, earlier work by Okun, ..



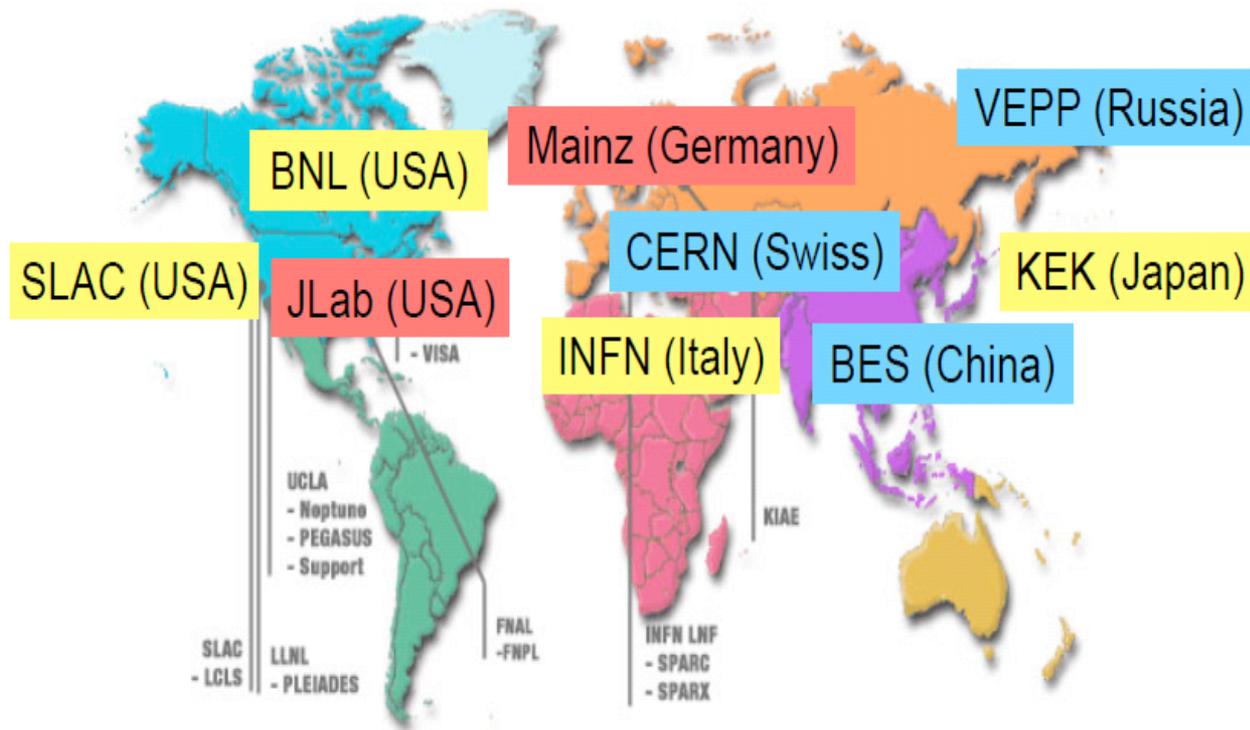
- extra $U'(1)$, new gauge boson A' (dark or hidden photon,...)
- $2\Delta L = \epsilon F^{\mu\nu} A'_{\mu\nu}$ - kinetic mixing
- γ - A' mixing, ϵ - strength of coupling to SM
- A' could be light: e.g. $M_{A'} \sim \epsilon^{1/2} M_Z$
- new phenomena: γ - A' oscillations, LSW effect, A' decays,...
- A' decay modes: $e+e^-$, $\mu+\mu^-$, hadrons,.. or $A' \rightarrow$ DM particles,
i.e. $A' \rightarrow$ invisible decays

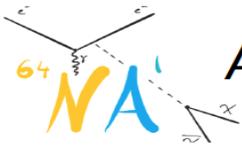
Large literature, >100 papers /few last years, many new theoretical and experimental results

A' search

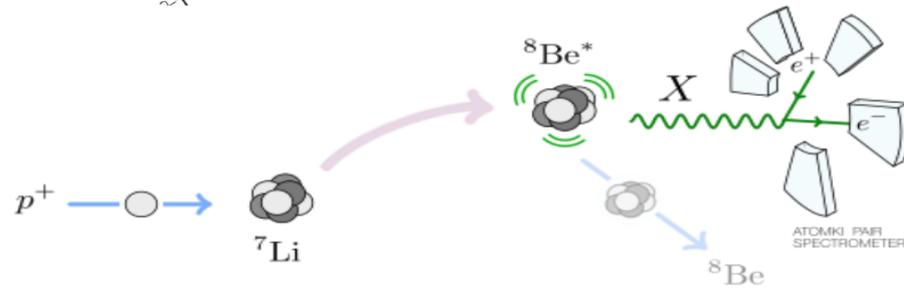
Dark Force searches in the Labs

Many searches for Dark Force in the Labs around the world (ongoing/proposed).



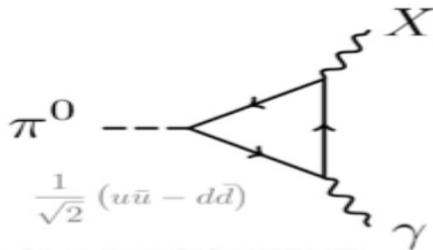


ATOMKI $^8\text{Be}^*$ anomaly: a new 17 MeV gauge boson?



Feng et al, 2016

X cannot be A' due to constraints from $\pi^0 \rightarrow X\gamma$ decay:



$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow X\gamma) \sim (\epsilon_u q_u - \epsilon_d q_d)^2 \sim 0$$

if $2\epsilon_u = -\epsilon_d \rightarrow$ **protophobic X**

$^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$, $M_X = 17$ MeV

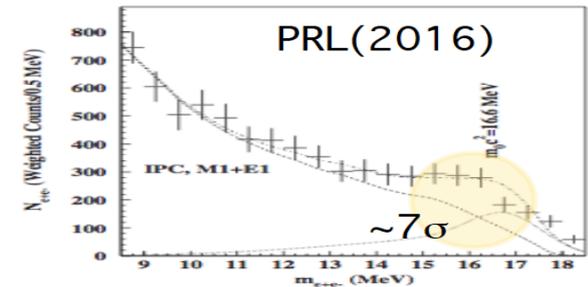


FIG. 5. Invariant mass distribution derived for the 18.15 MeV transition in ^8Be .

