



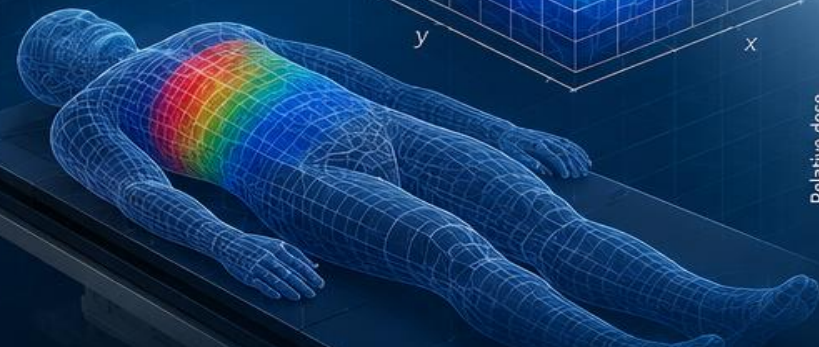
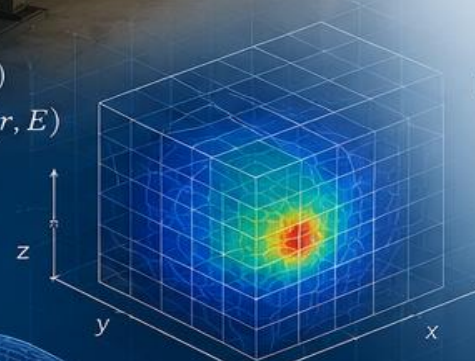
МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛ НА ВЪЗДЕЙСТВИЕТО НА ЙОНИЗИРАЩИТЕ ЛЪЧЕНИЯ ВЪРХУ ЖИВАТА МАТЕРИЯ



Монте Карло моделиране на взаимодействието на йонизиращите лъчения с биологична материя

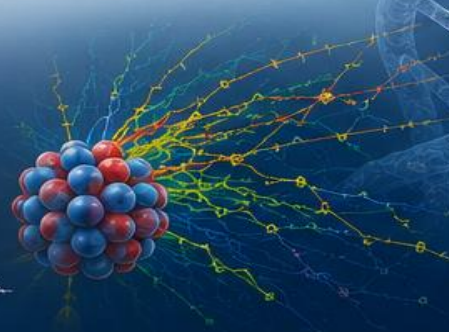
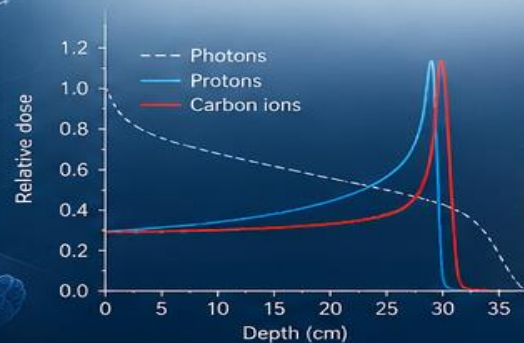
$$-\nabla \cdot (D(r, E) \nabla \psi(r, E)) + \Sigma_t(r, E) \psi(r, E) = Q(r, E)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

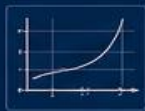


Иван Михайлов Цанев

Научен ръководител: проф. дфзн Леандър Борисов Литов



АДРОННА ТЕРАПИЯ



BRAGG PEAK И ДОЗИМЕТРИЯ



ЛИНЕЕН ЕНЕРГИЕН ТРАНСФЕР (LET)



FLASH / UHDR ОБЛЪЧВАНЕ



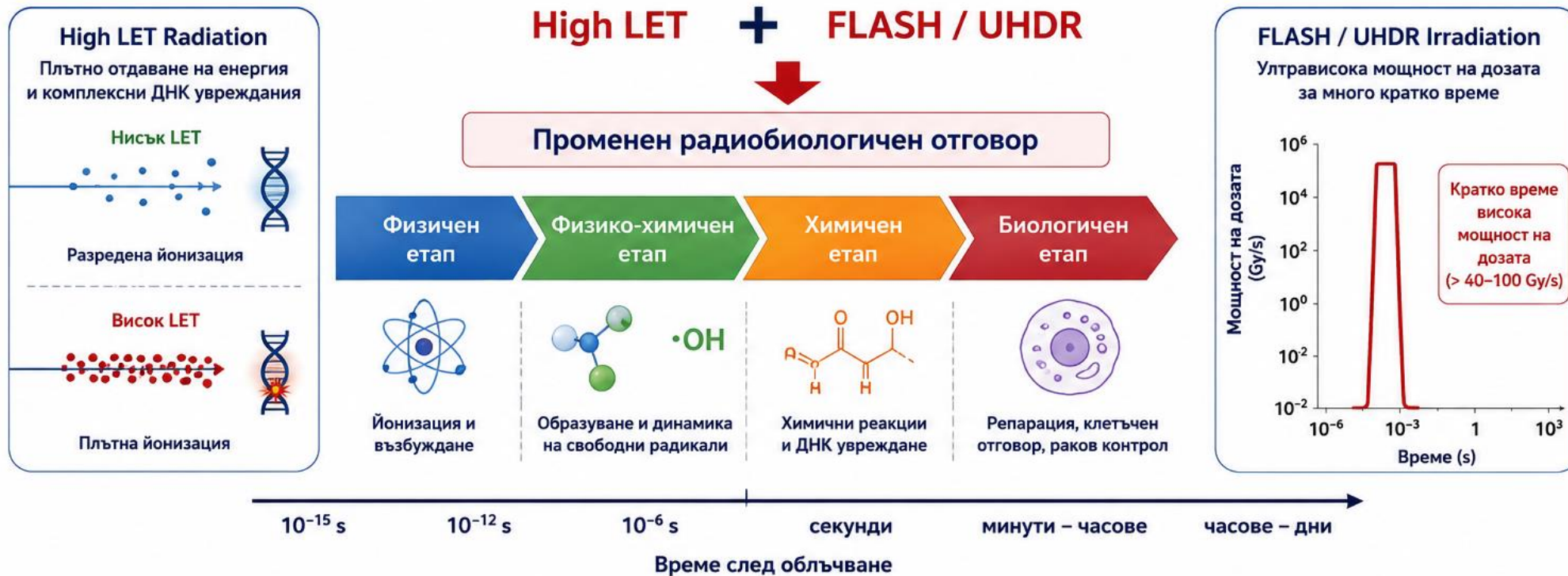
МОНТЕ КАРЛО СИМУЛАЦИИ



ДИАГНОСТИЧНА РАДИОЛОГИЯ

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Радиационният ефект се формира чрез сложна верига от процеси, протичащи в огромен диапазон от пространствени и времеви мащаби



Monte Carlo Modelling

Детайлно моделиране на транспорта на частици, разпределението на дозата, LET характеристиките и вторичните частици





GEANT4
Simulation Toolkit



FLUKA
Monte Carlo Code



FLUKA
Monte Carlo Code

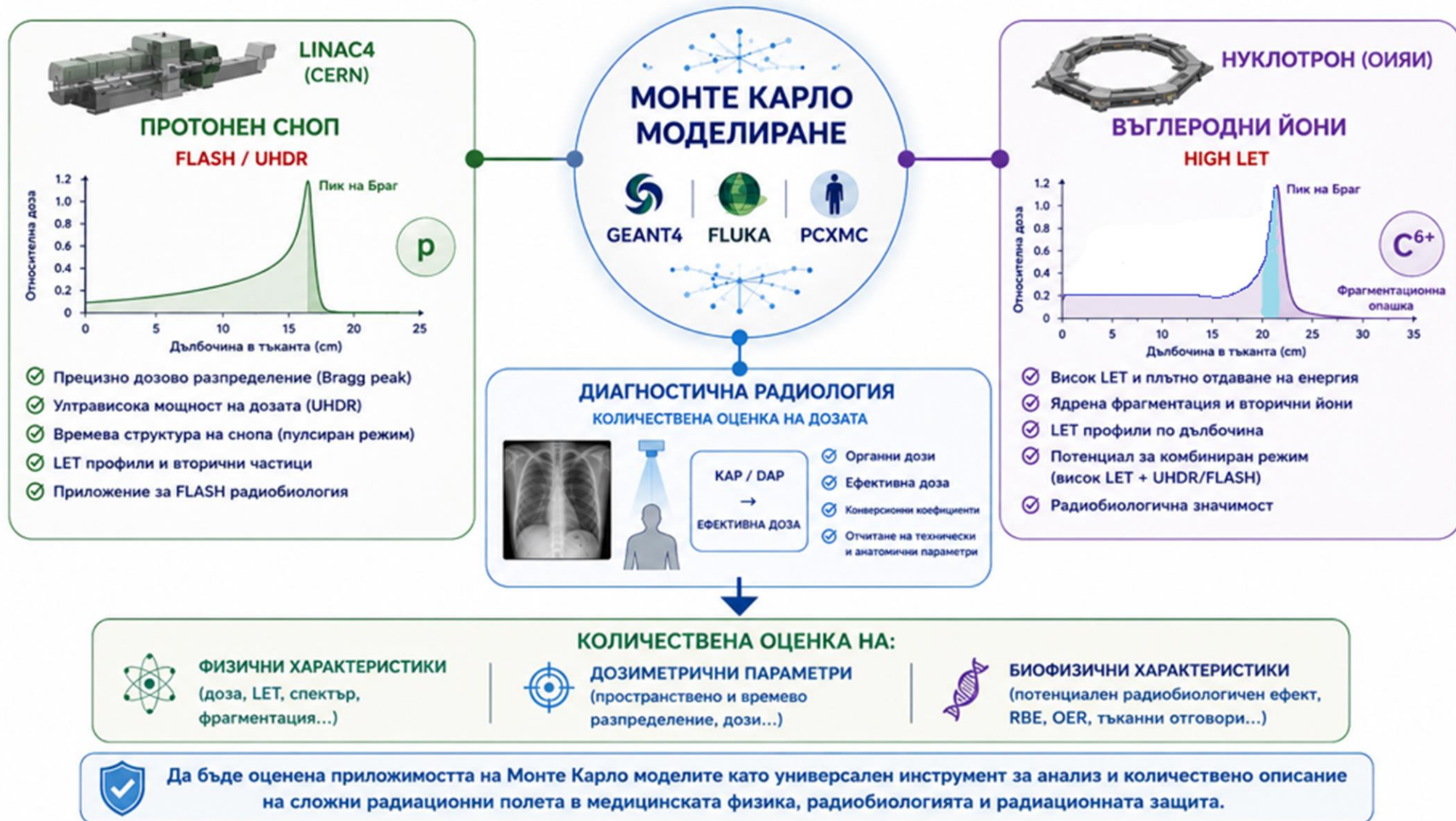


PCXMC
Patient Dose Calculation

Необходима е надеждна физична и биофизична оценка чрез съвременни Монте Карло методи за разбиране, оптимизация и безопасно приложение на нови режими на облъчване

ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Основната цел е чрез използване на съвременни Монте Карло методи да бъдат изследвани физичните, дозиметричните и биофизичните характеристики на взаимодействието на йонизиращото лъчение с биологична среда при условия, релевантни за ултрависоки мощности на дозата (UHDR/FLASH) и облъчване с високо-LET частици, както и да бъдат разработени подходи за количествена оценка на дозиметрични параметри при медицински приложения.

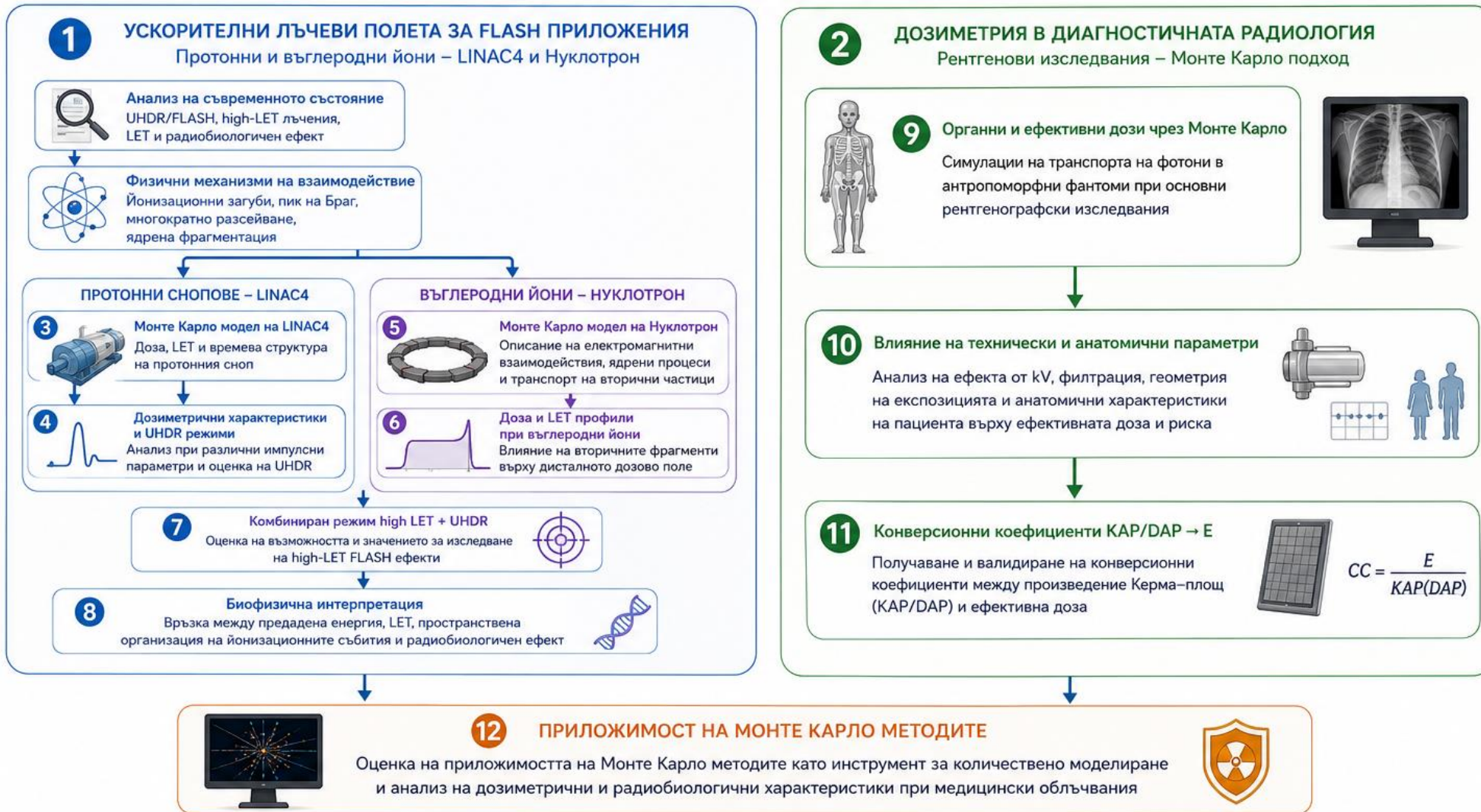


ОСНОВНИ ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

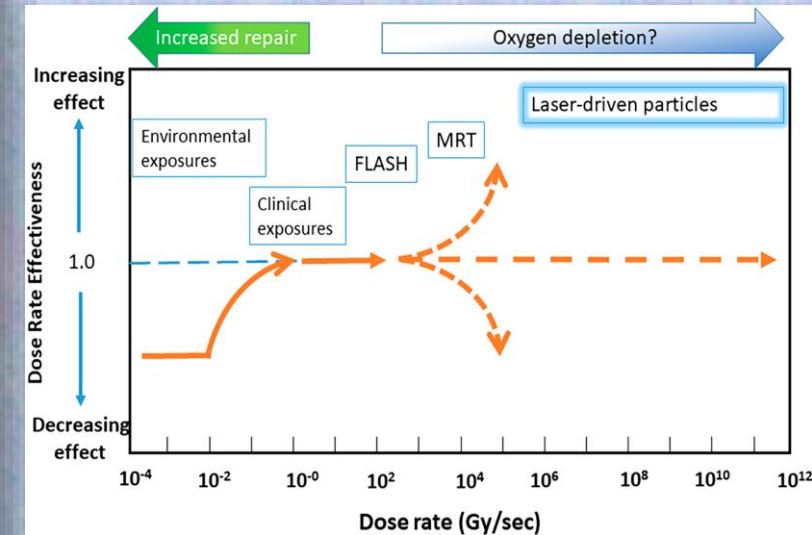
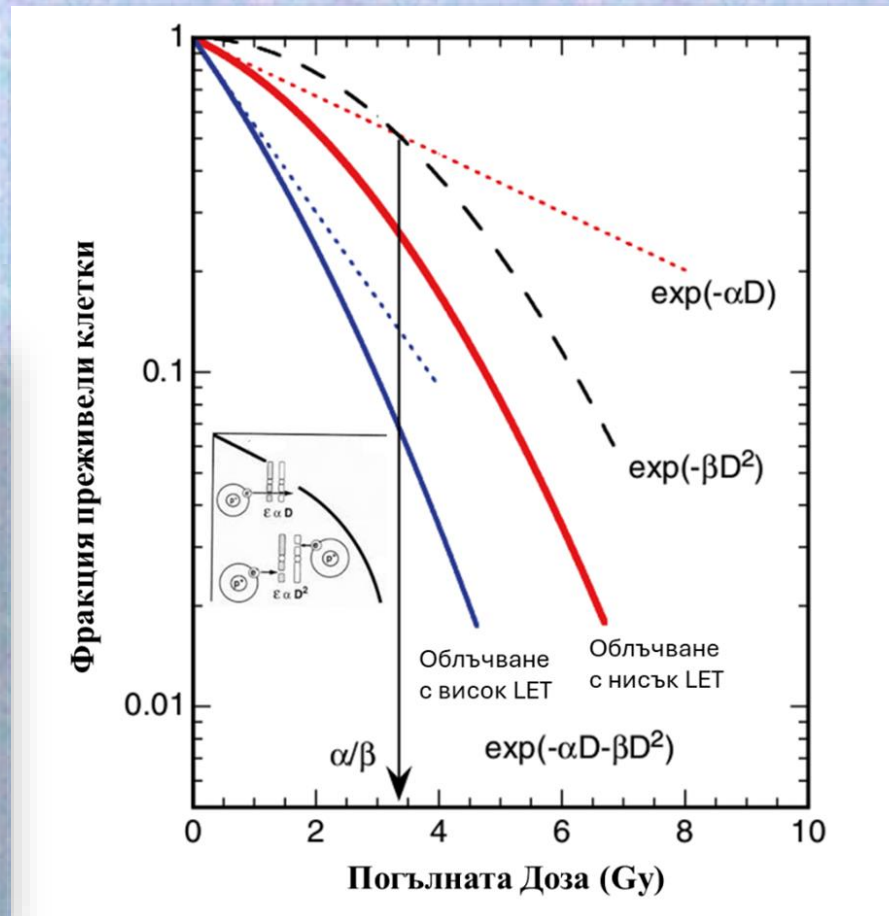
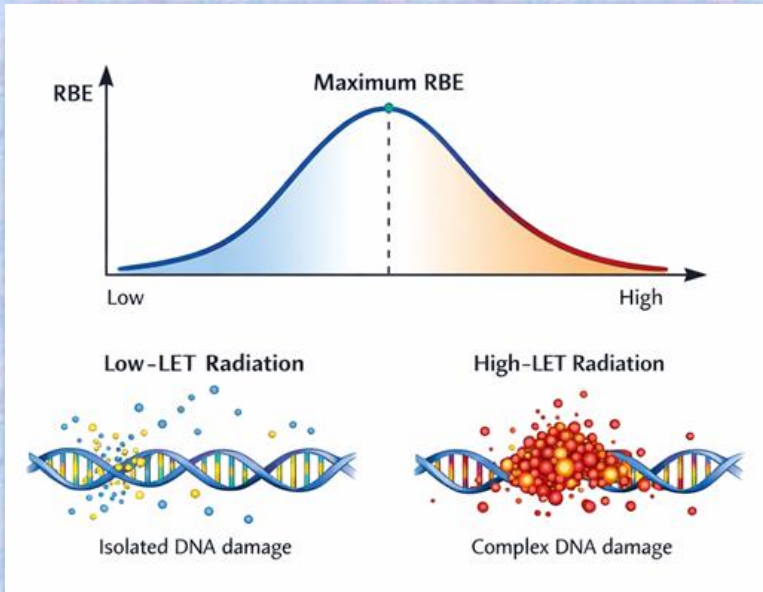


ЦЕЛ: Чрез използване на съвременни Монте Карло методи да бъдат изследвани физичните, дозиметричните и биофизичните характеристики на взаимодействието на йонизиращото лъчение с биологична среда при условия, релевантни за **UHDR/FLASH** и облъчване с **високо-LET** частици, както и да бъдат разработени подходи за количествена оценка на дозиметрични параметри при медицински приложения.

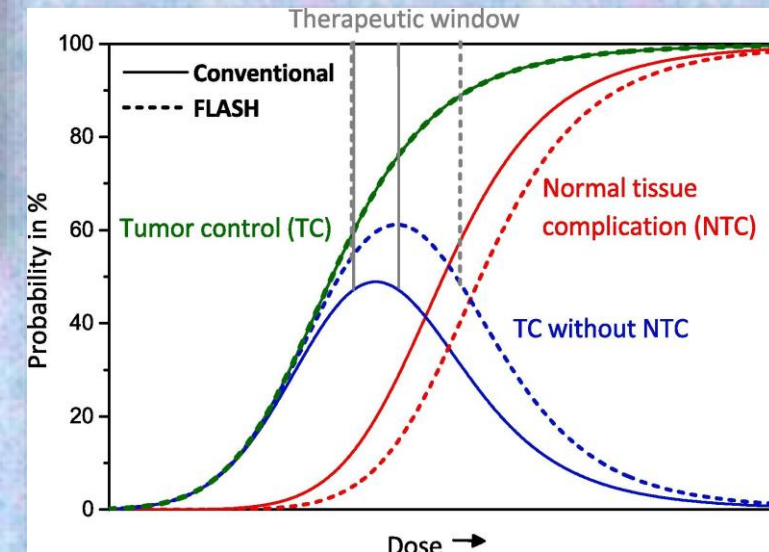
ДВА ОСНОВНИ НАПРАВЛЕНИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕ



ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО



<https://doi.org/10.3389/fphy.2021.624963>

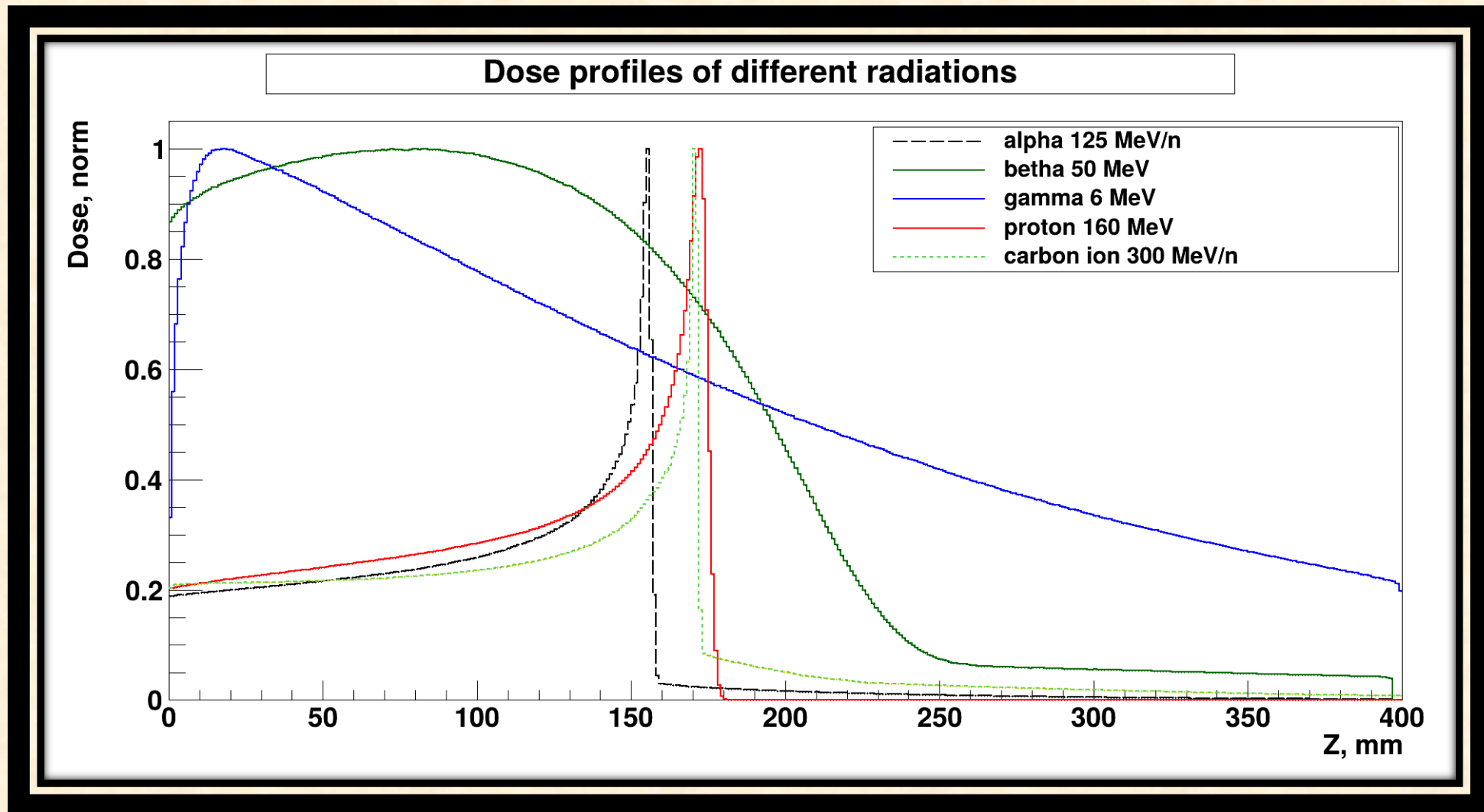


<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.09.020>

Дозиметрични и радиобиологични величини

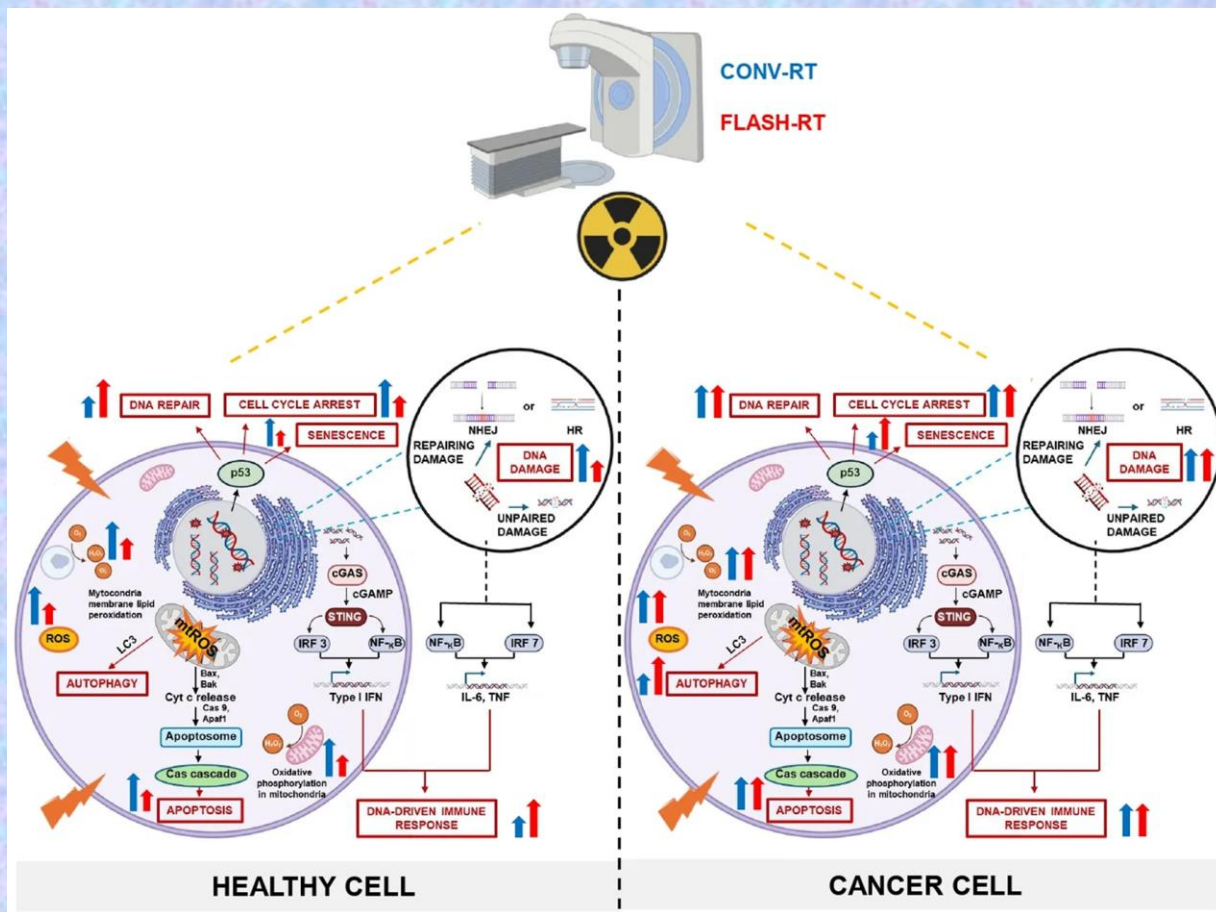
ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Адронна терапия

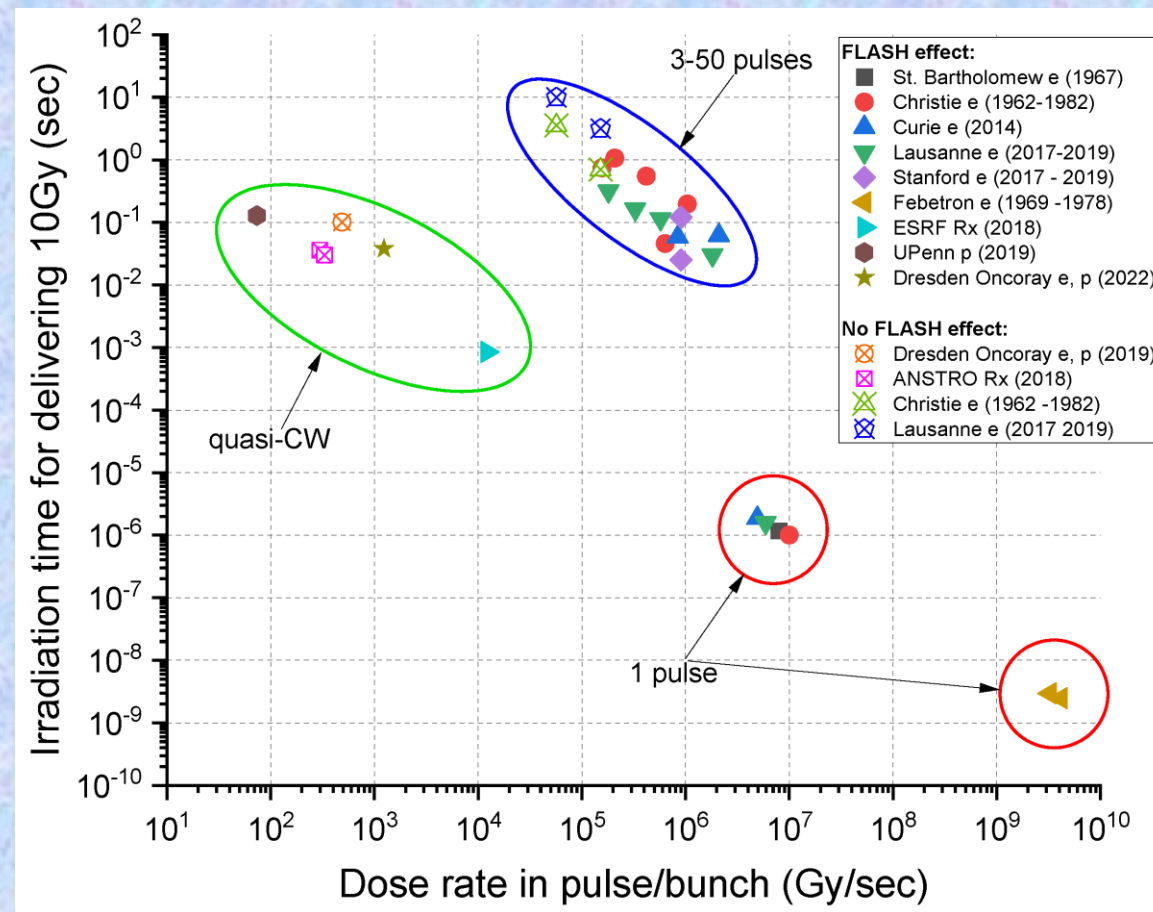


ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

FLASH радиотерапия

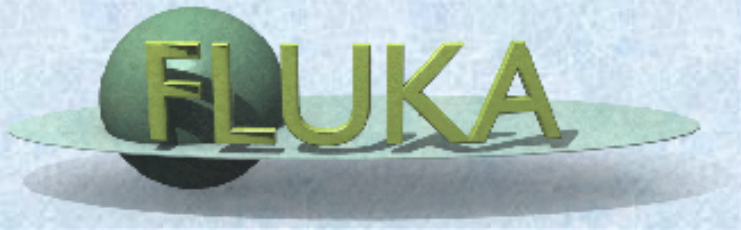


<https://doi.org/10.3389/fcell.2025.1575678>



<https://doi.org/10.3390/app13085021>

Методология – Монте Карло



Рентгенология



Адронна терапия



За решаване на поставените задачи са използвани три независими Монте Карло платформи, приложени към различни физични и дозиметрични проблеми.

LINAC4



<https://cds.cern.ch/record/2260707/files/Linac4-3.jpg>

LINAC4

Geant4 модел

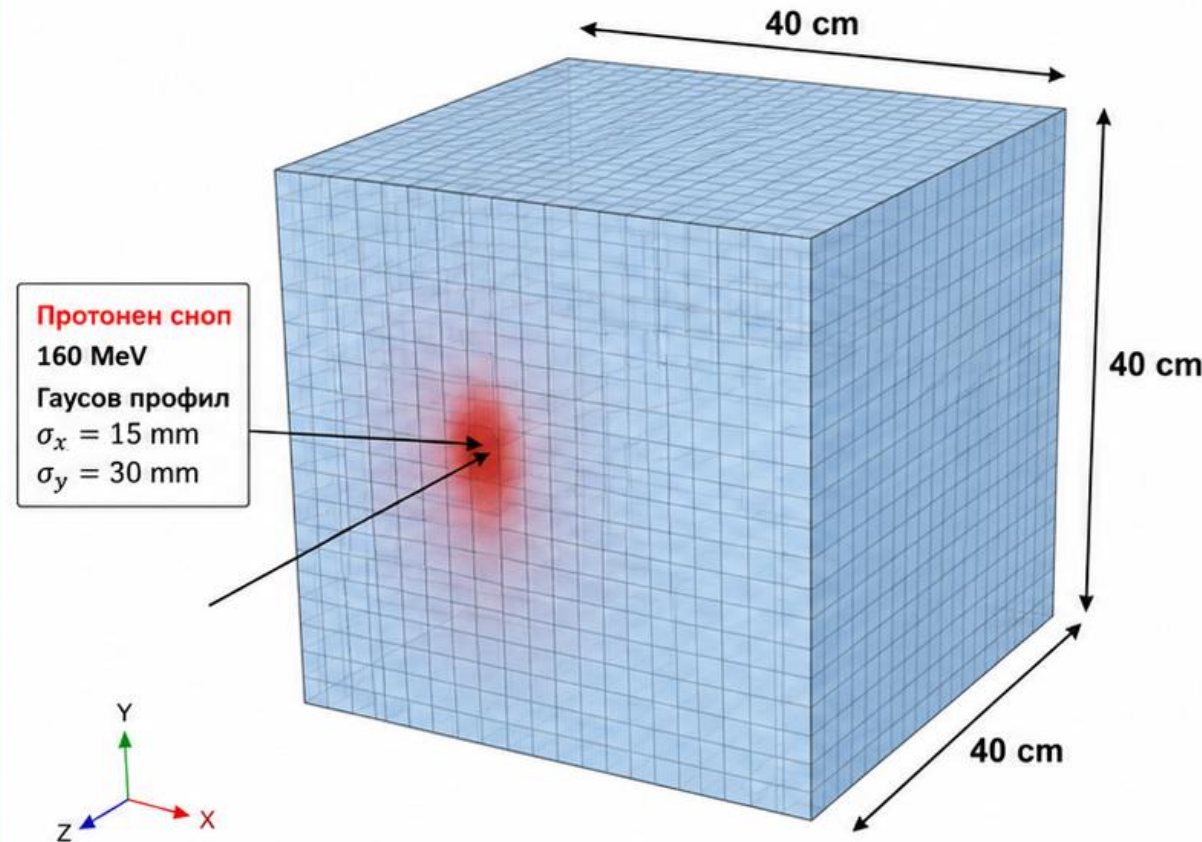
Параметри на снопа

- 160 MeV протони
- Гаусов профил
- $\sigma_{x,y} = 15 \times 30 \text{ mm}$

Воден фантом (детектор)

- Материал: вода (G4_WATER)
- Размери: $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$
- Изграден като детекторна система от воксели
- Резолюция на вокселите:
 $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$

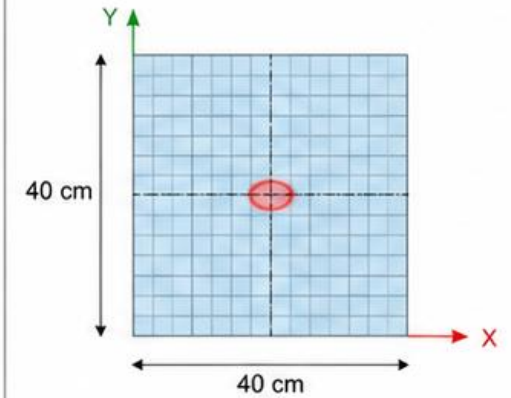
Геометрия на симулацията (Geant4)



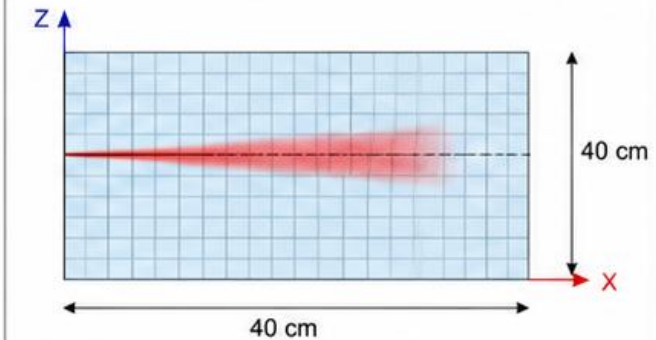
Основни елементи на модела:

- Първичен протонен сноп (Гаусов профил)
- Воден фантом (детекторна система)
- Вокселна структура

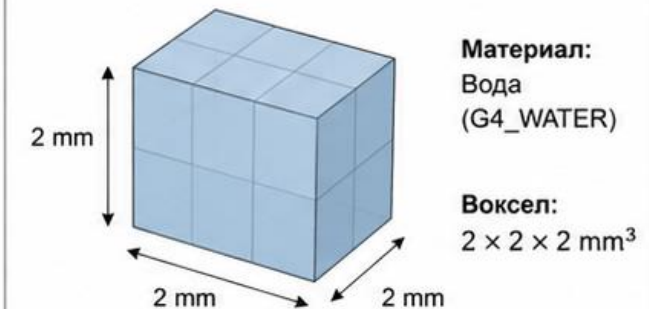
Изглед отпред (XY равнина, $z = 0$)



Изглед отстрани (XZ равнина, $y = 0$)

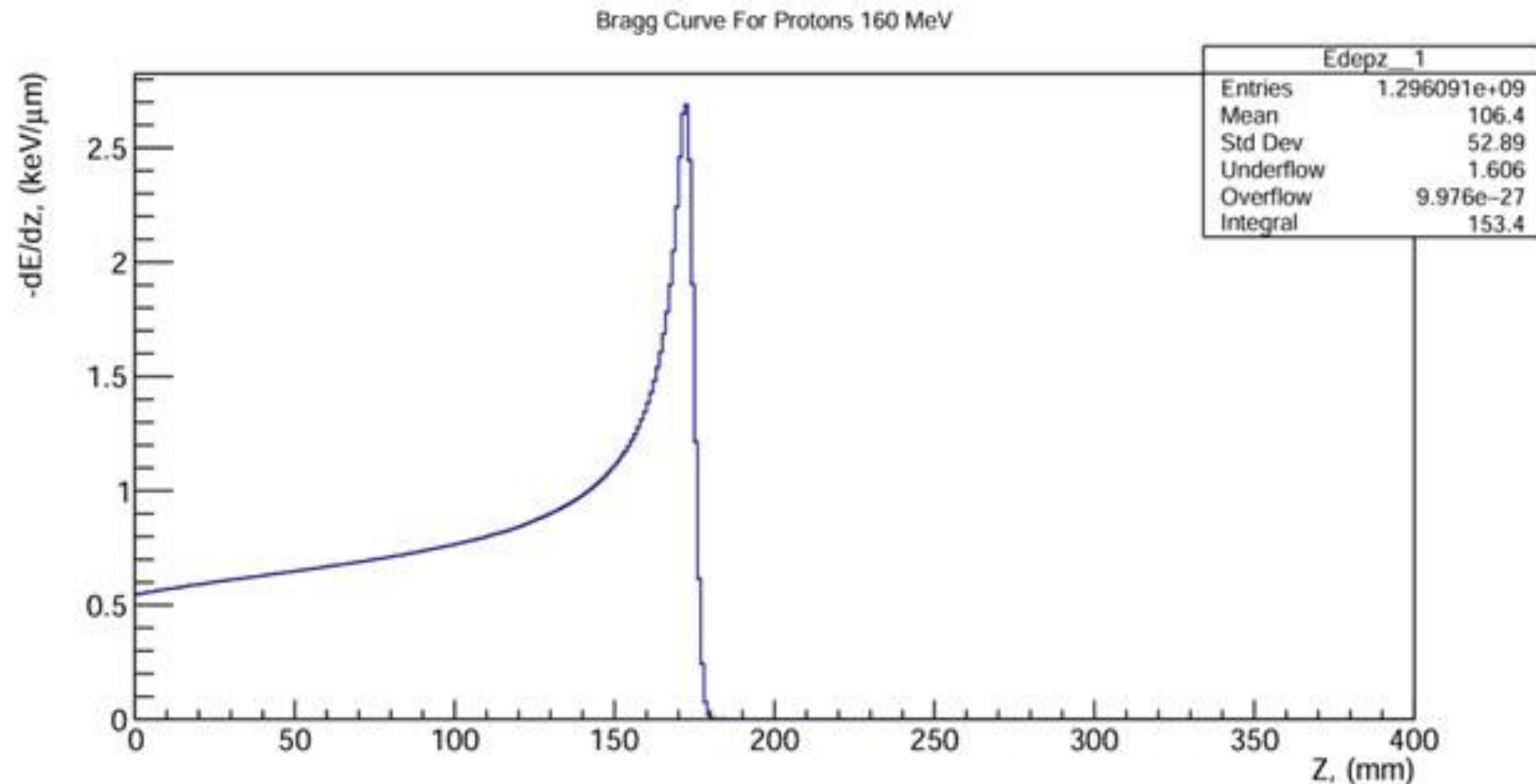


Детайл на вокселите



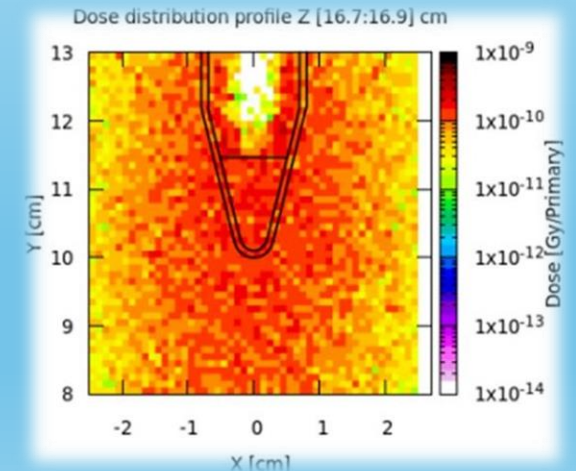
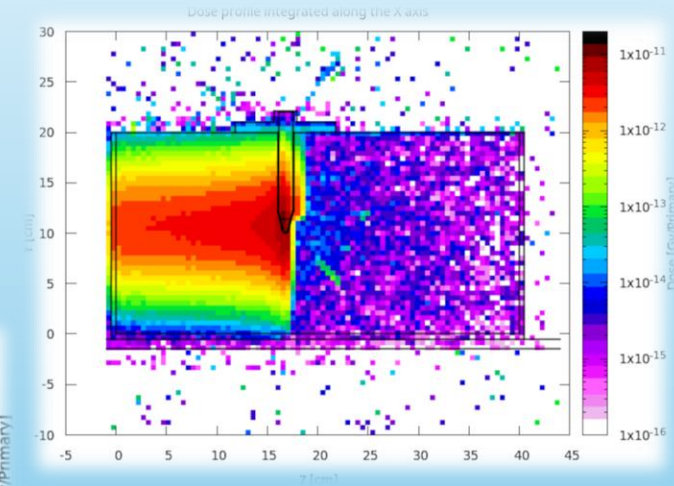
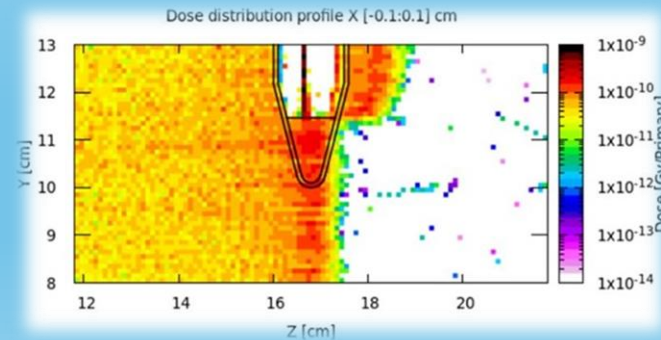
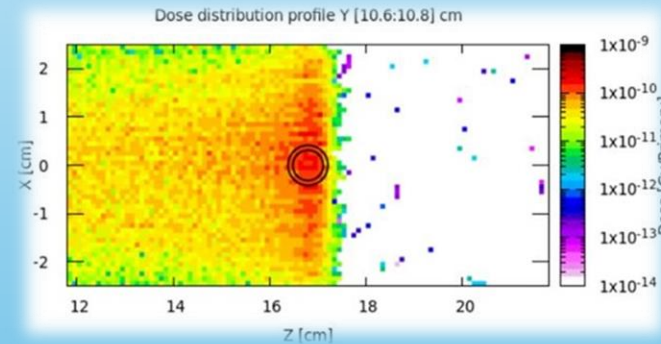
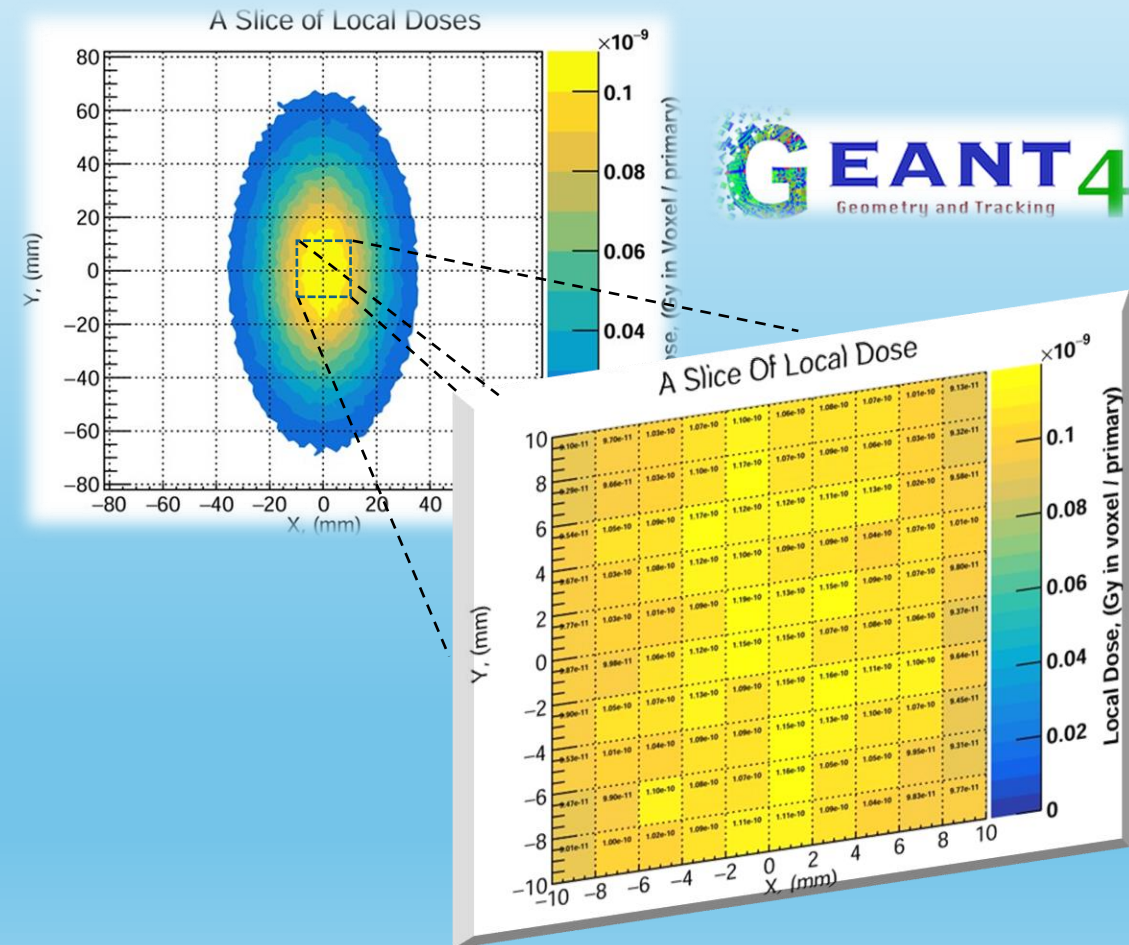
Разпределение на енергийните загуби по дълбочина във воден фантом

LINAC4



<https://doi.org/10.1088/1361-6560/ae4570>

Пространствена хомогенност на облъчването



Оценка на потенциала за FLASH-облъчване

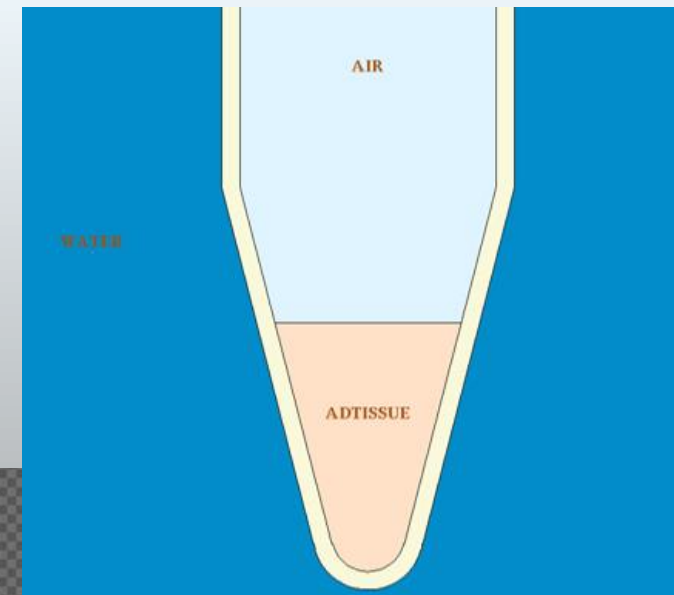
Параметър	LINAC4	Източник на информация	Бележки
Енергия на снопа	160 MeV	Оперативна спецификация	Енергии при експлоатационен добив
Тип на частиците	Протон (H ⁺)	Оперативна спецификация	—
Разстояние между микроструктурите	352 MHz (2.8 ns)	Оперативна спецификация	Дефинира структурата за оценка на моментната доза
Продължителност на импулса	0.4 – 2.4 ms	Оперативна спецификация	Работни диапазони, използвани в симулациите. Праг за FLASH < 500 ms
Честота на повторение на импулсите	2 Hz	Оперативна спецификация	Честота на повторение на LINAC4
Частици на микро сноп/импулс	8.4 × 10 ⁸ протони на микро сноп до 10 ⁵ микро снопа на импулс	Оперативна спецификация	Заложено преди въвеждане в експлоатация
Параметри на фазовото пространство	Излъчване 0,3–0,4π mm·mrad; Разсейване 1–3 mrad	Оперативна спецификация	Моделирани входни данни
Моделиран обем на извадката	5 ml	за дребномащабни анализи (1–5) ml	Представителни радиобиологични обеми
Доза на първична частица	~0.1 nGy	GEANT4/FLUKA	ширина на снопа σ _{xy} 15 × 30 мм
Доза на импулс	2.5 – 7 × 10 ⁴ Gy	Оценено от ОС и МК симулация	В зависимост от дизайна на импулсите
Време за доставяне на 10 Gy	0.4 μs – 1.6 ms	Оценено от ОС и МК симулация	Зависи от интензитета на снопа
Средна мощност на дозата за импулс	6.25 × 10 ³ – 2.50 × 10 ⁷ Gy/s	Оценено от ОС и МК симулация	В зависимост от дизайна на импулсите
Средна мощност на дозата	5 – 10 ⁵ Gy/s	Оценено от ОС и МК симулация	Зависи от интензитета на снопа
Пространствена нехомогенност на дозата	<5% в проба от 5 ml	GEANT4/FLUKA	От карти на дозите, базирани на симулация

Nuclotron



Nuclotron – Монте Карло модел

Гаусов сноп въглеродни йони - ^{12}C
с ширина 40 x 40 мм и енергия 430 MeV/n

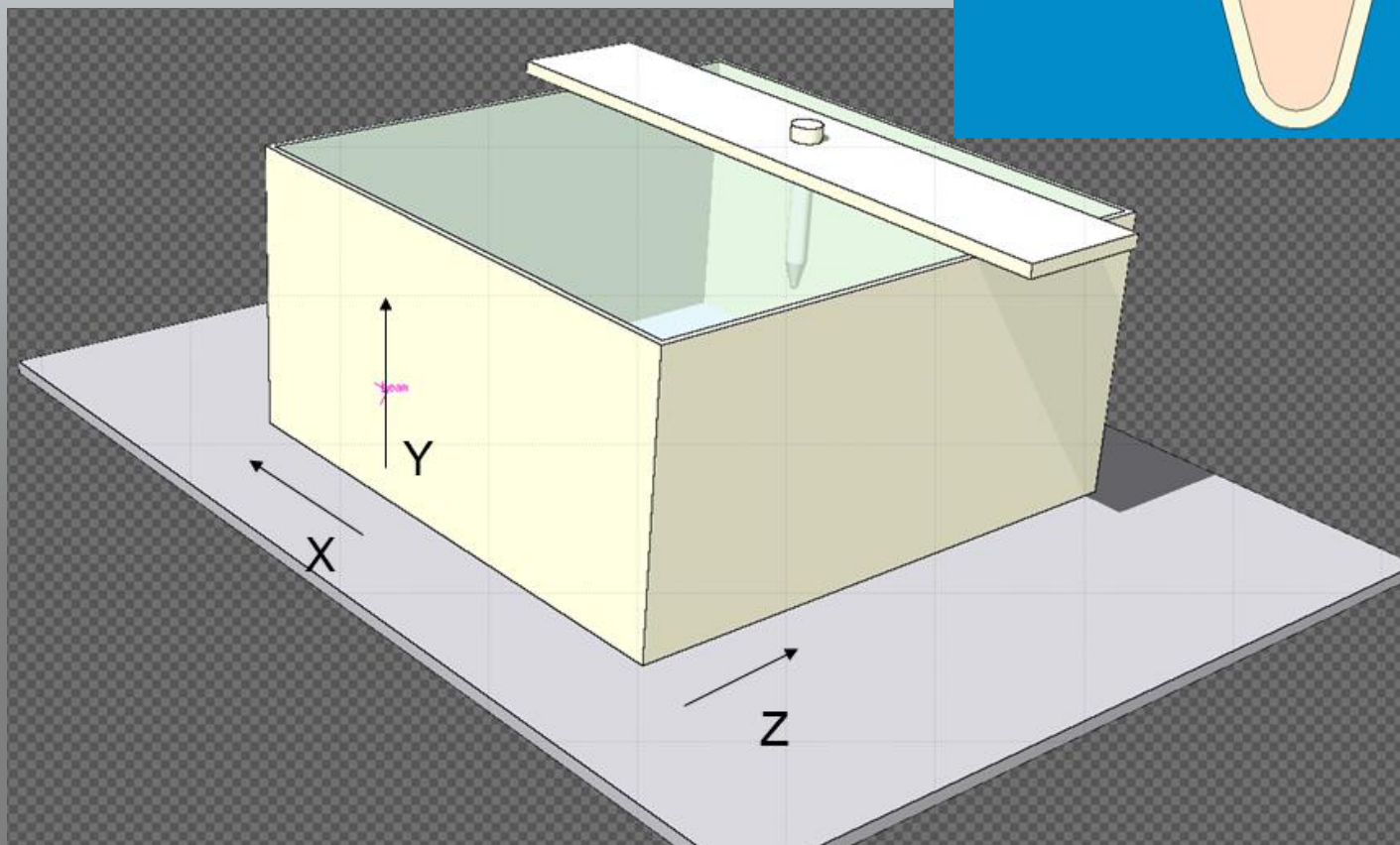


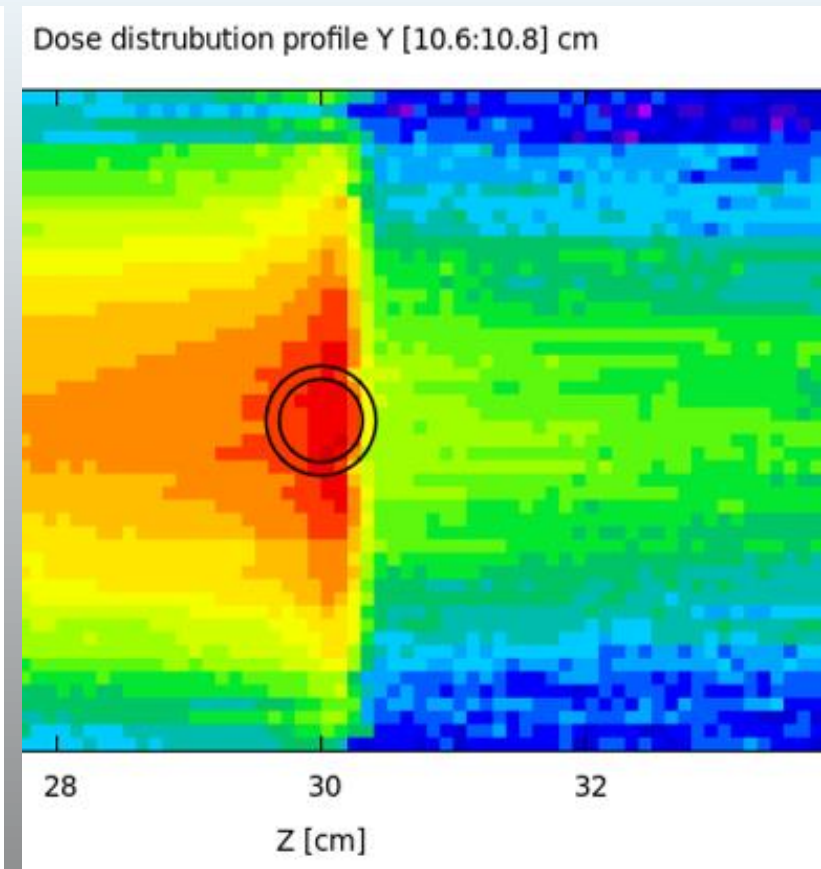
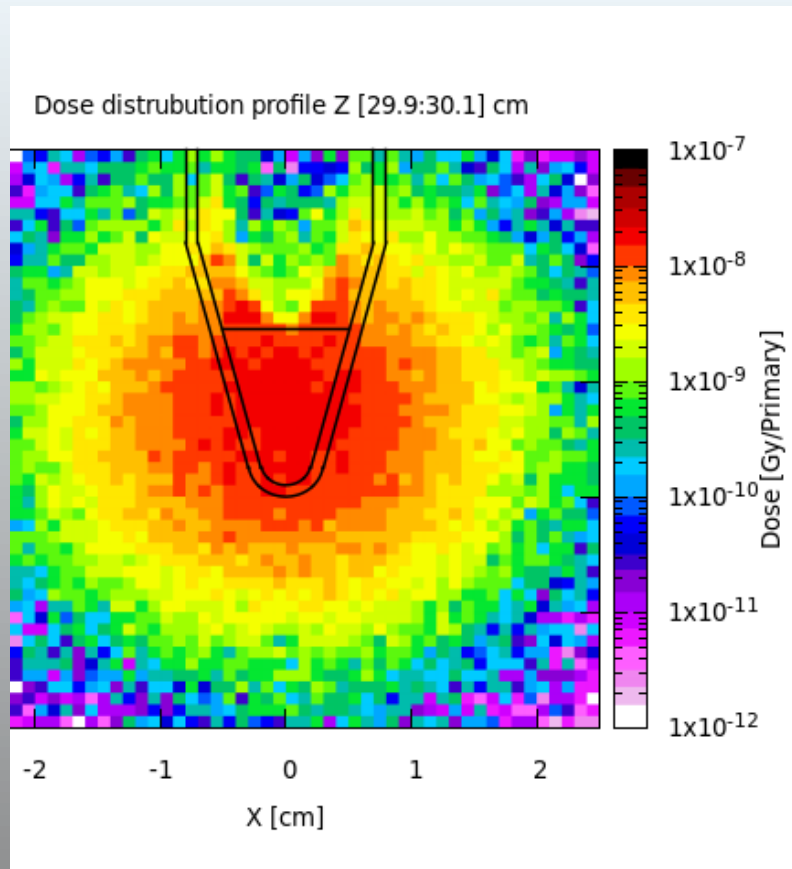
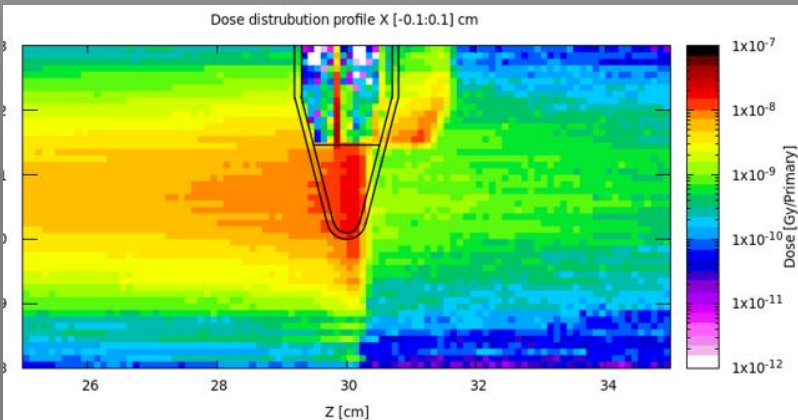
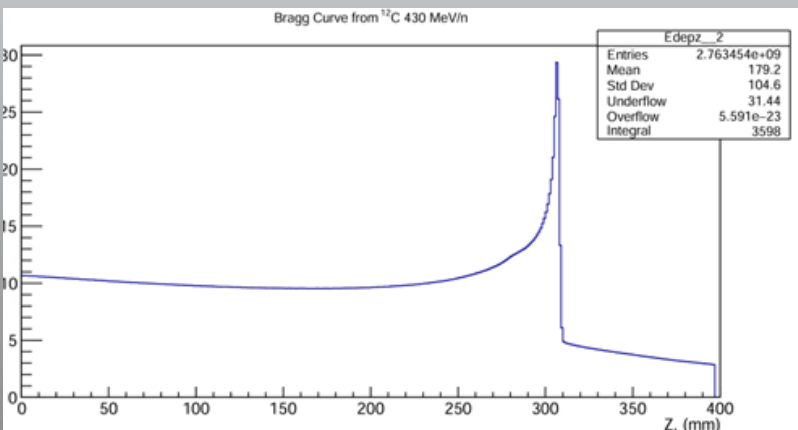
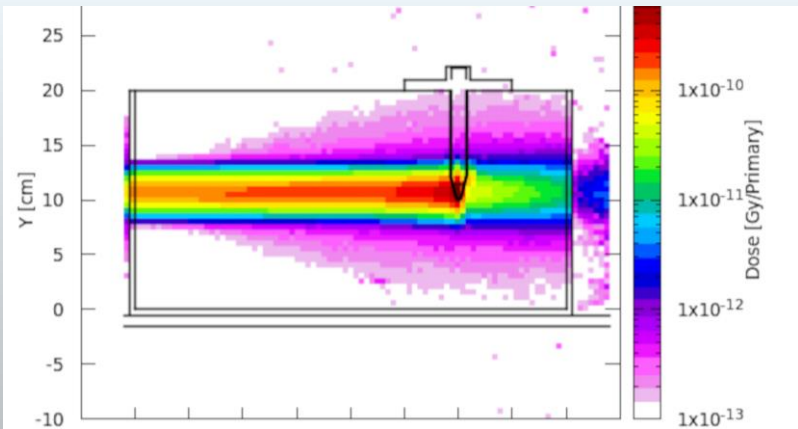
Разработен дигитален фантом.
Представящ контейнер за вода:

- с размери 40 x 40 x 40 см и дебелина на стените 0.5 см;
- поставен върху алуминиева подложка с дебелина 1 см.

Подвижна приставка чрез която да се закрепват и позиционират

- дозиметрични системи
- клетъчни култури за радиобиология



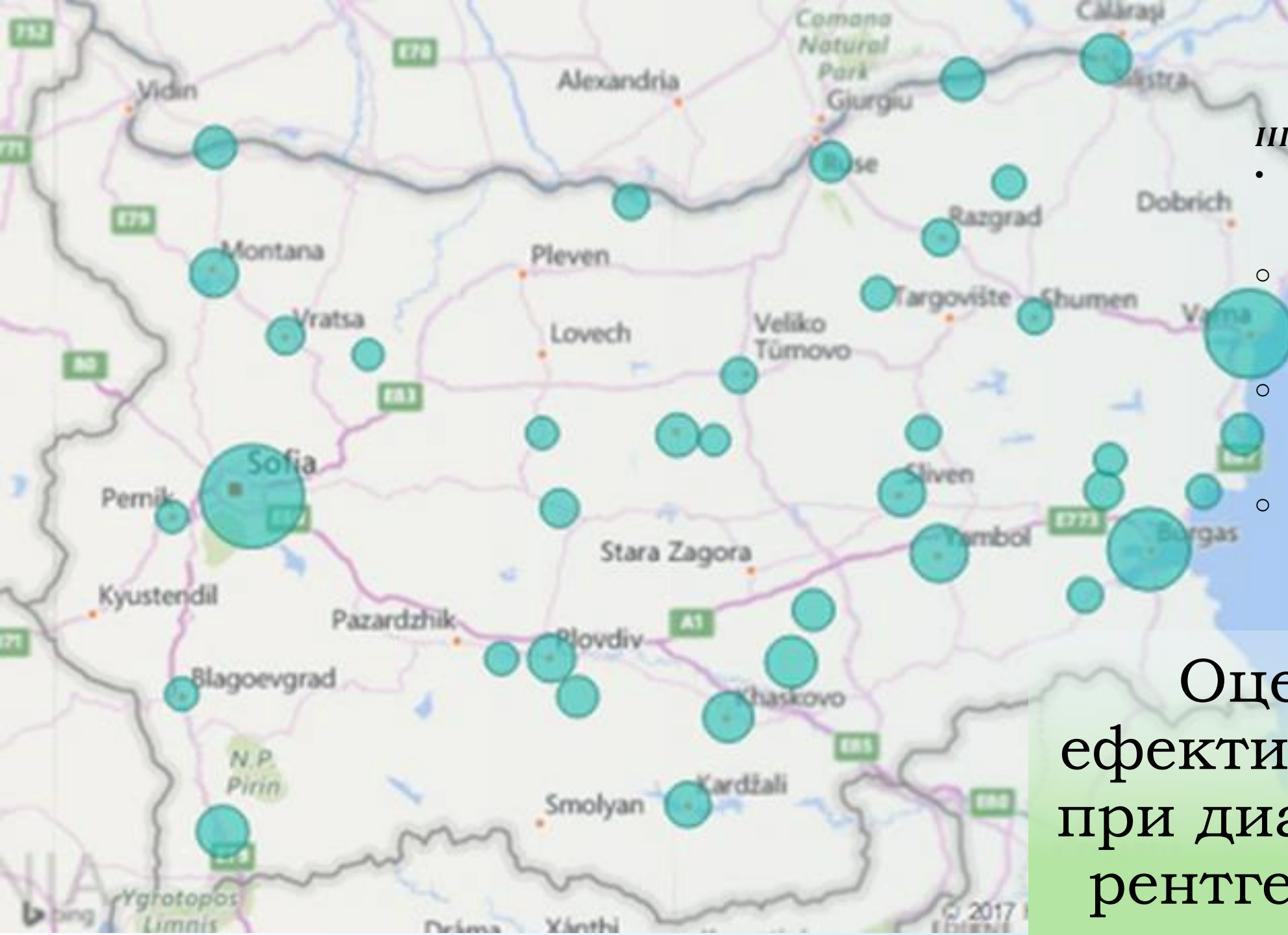


Разпределение на дозата от сноп 430 MeV/u
въглеродни йони с ширина $\sigma_{x,y} = 40 \times 40$ мм

Nuclotron

Потенциал за High-LET FLASH

Параметър	Нуклотрон	Източник на информация	Бележки
Енергия на снопа	До 550 MeV/u	Оперативна спецификация	Енергии при експлоатационен добив
Тип на частиците	Въглероден йон (C ⁶⁺)		—
Продължителност на импулса	0.4–0.7 s	Долна граница при бавно извеждане	Работни диапазони, използвани в симулациите. Праг на FLASH < 500 ms
Честота на повторение на импулсите	Регулируема	Оперативна спецификация	
Частици на импулс	от 1×10^8 до 7×10^9 йона на екстракция	Оперативна спецификация	Заложено преди въвеждане в експлоатация
Параметри на фазовото пространство	Излъчване 0,4–0,6π мм·мрад; Разсейване 2–4 мрад	Оперативна спецификация	Моделирани входни данни
Моделиран обем на извадката	5 ml	за дребномащабни анализи (1–5) ml	Представителни радиобиологични обеми
Доза на първична частица	~10 nGy	GEANT4/FLUKA	ширина на снопа σ_{xy} 40 × 40
Доза на импулс	1–70 Gy	Оценено от ОС и МК симулация	В зависимост от дизайна на импулсите
Време за доставяне на 10 Gy	0.1–1 s	Оценено от ОС и МК симулация	Зависи от интензитета на снопа
Средна мощност на дозата за импулс	$1 - 2 \times 10^2$ Gy/s	Оценено от ОС и МК симулация	В зависимост от дизайна на импулсите
Средна мощност на дозата	$1 - 10^2$ Gy/s	Оценено от ОС и МК симулация	Зависи от интензитета на снопа
Пространствена нехомогенност на дозата	<3% в проба от 5 ml	GEANT4/FLUKA	От карти на дозите, базирани на симулация



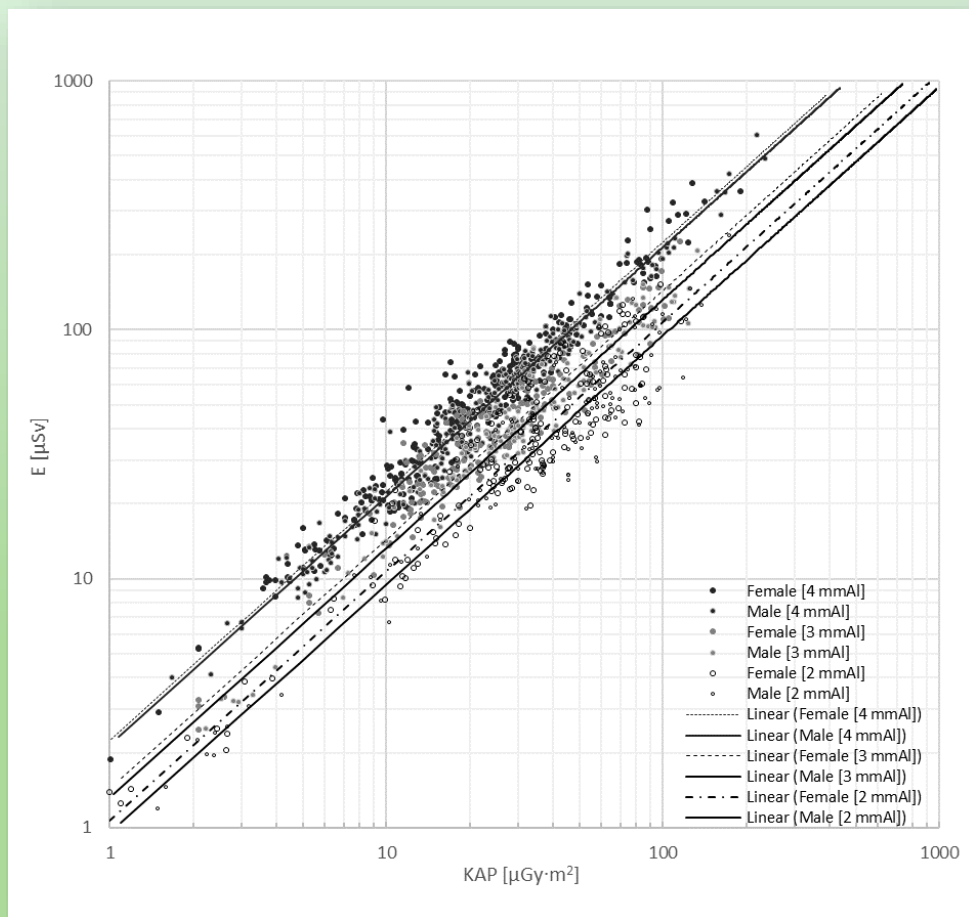
III^{то} национално проучване

- Чрез РСХМС анализирани клинични данни за:
 - Гръден кош
 - 1723 изследвания
 - 81 рентгенови системи
 - Корем
 - 359 изследвания
 - 34 рентгенови системи
 - Таз
 - 468 изследвания
 - 41 рентгенови системи

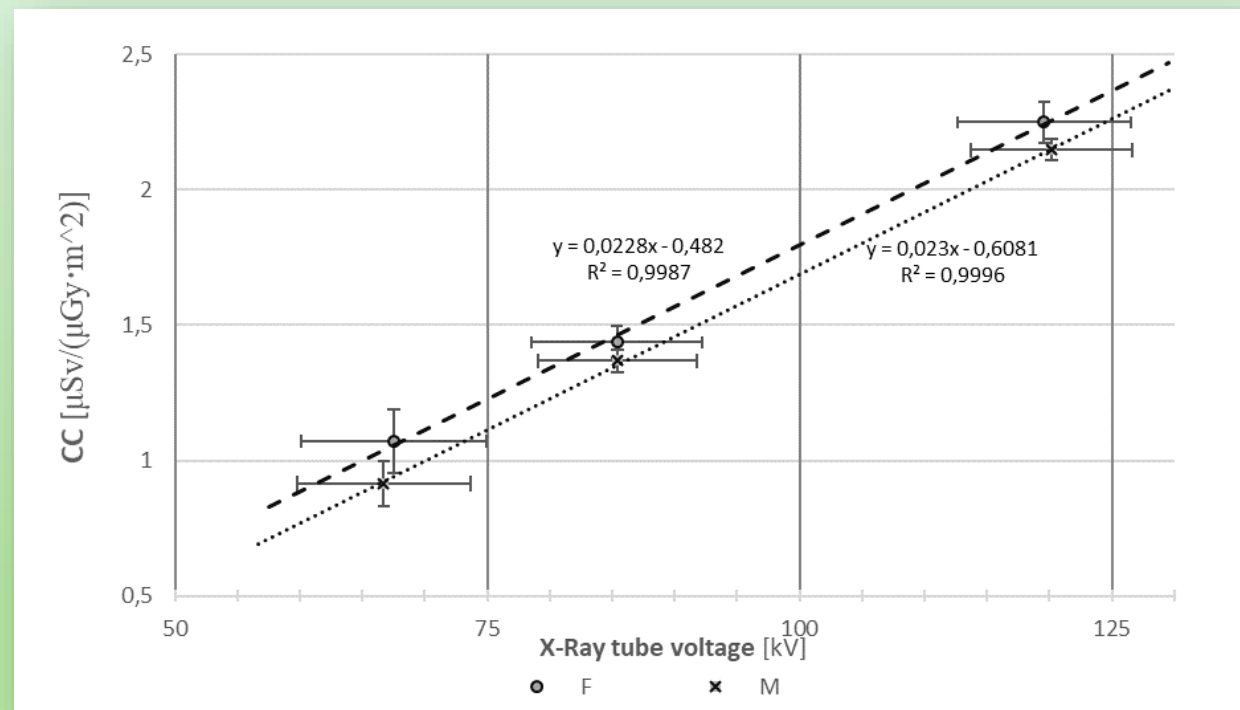
Оценка на ефективната доза при диагностична рентгенография

Резултати за СС за рентгенография на гръден кош

Effective dose vs KAP/DAP & kVp



Conversion coefficient vs kVp



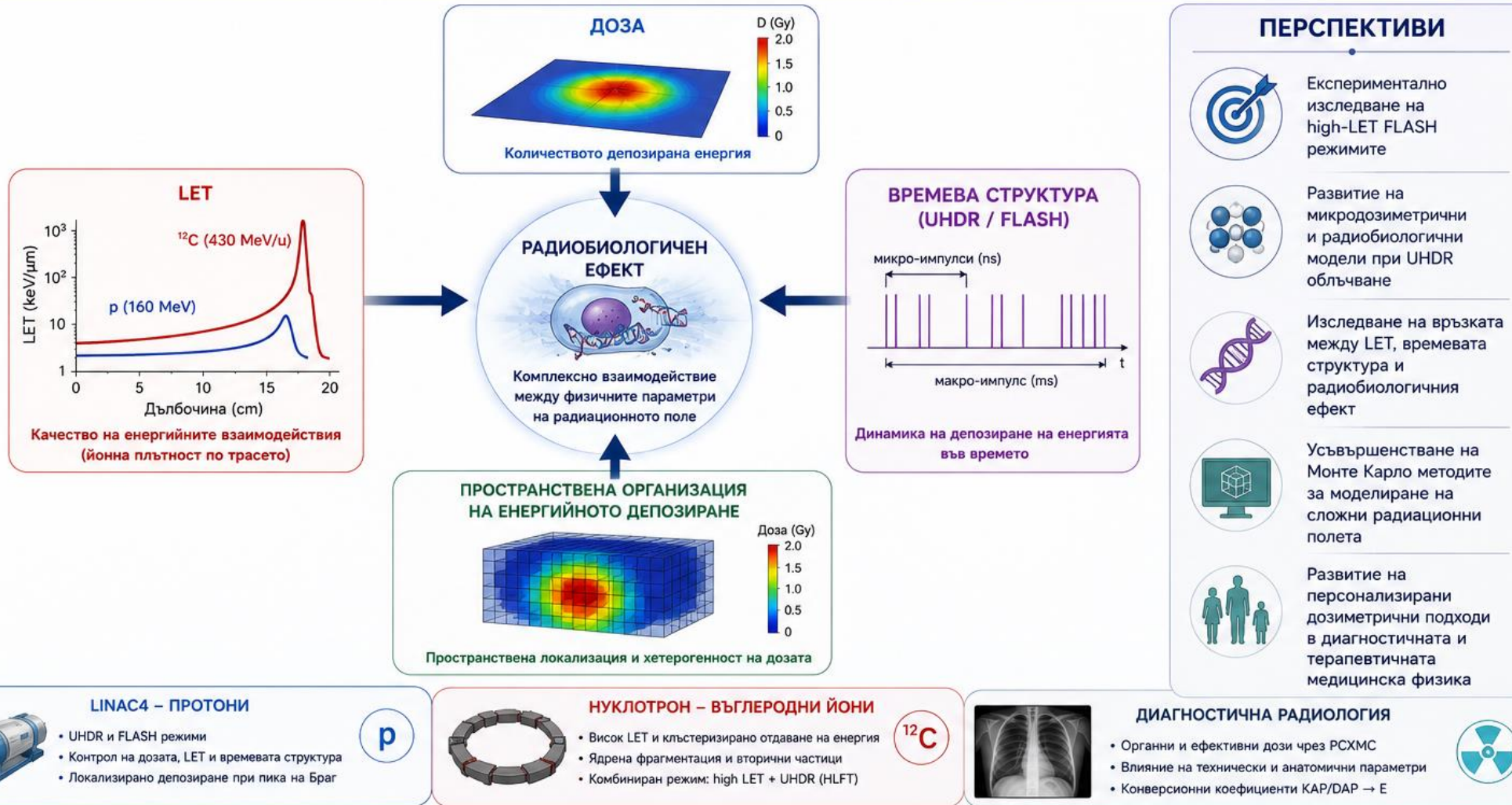
Резултати за СС за, Гръден кош-АП, Корем-АП и Таз-АП

Процедура	КАР→Е, Man	КАР→Е, Woman	Hart et al 1994	UNCEAR
Chest AP-soft	0,09 – 0,14	0,12 – 0,15	0,20	0,12 – 0,15
Chest AP-hard	0,22	0,23		0,08 – 0,11
Abdomen AP	0,11	0,13	0,26	0,15 – 0,20
Pelvis AP	0,11	0,09	0,20	0,20 – 0,25

Резултатите демонстрират необходимостта от локално валидирани конверсионни коефициенти и показват потенциала за допълнителна оптимизация на дозовото натоварване в съвременната рентгенографска практика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВИ

Биологичният ефект при съвременните режими на облъчване е резултат от съвместното действие на **дозата**, **LET**, **пространственото разпределение на енергията** и **времената структура** на облъчването, а **Монте Карло моделите** предоставят естествената рамка за количественото им описание.



Основни научно-приложни приноси

1. Разработен и приложен интегриран **Монте Карло** подход за моделиране на протонни и въглеродни йонни снопове при условия, релевантни за UHDR/FLASH облъчване.
2. Извършен е дозиметричен, LET и времеви анализ на протонен сноп от LINAC4 и е оценен потенциалът му за реализиране на контролируеми **UHDR** режими.
3. Извършен е дозиметричен и LET анализ на въглероден йонен сноп от Нуклотрон, включително оценка на ролята на ядрената фрагментация и вторичните частици.
4. Показана е възможността за формиране на радиационни полета с едновременно висок LET и ултрависока мощност на дозата – **физична основа за изследване на high-LET FLASH радиобиологични ефекти**
5. Установена е връзката между пространственото разпределение на енергията, LET характеристиките, структурата на йонизационните трасета и очаквания радиобиологичен ефект при UHDR облъчване.
6. Определени са органни и ефективни дози **чрез Монте Карло симулации** и са валидирани **конверсионни коефициенти $K_{AP \rightarrow E}$** за основни рентгенографски изследвания.

Публикации по дисертационния труд



Tsanev, I.; Markova, V.; Pavlov, B.; Petkov, P.; Litov, L. (2026) Feasibility of FLASH Radiobiology with Proton and Carbon Ion Beams Using LINAC4 and Nuclotron Accelerators. *Physics in Medicine & Biology*, 71(4), 045018. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ae4570>.

20 т.

SJR (2025): 0.821; JCR-IF (Web of Science):3,1; Q2



Dimov, A., Tsanev, I., Penev, D. (2019). Technique and Gender Specific Conversion Coefficients for Estimation of Effective Dose from Kerma Area Product During X-Ray Radiography of Chest. *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018, IFMBE Proceedings*, 68(1), pp 719–723 https://doi.org/10.1007/978-981-10-9035-6_133

10 т.

SJR (2019): 0.158

Общо 30 т.

Апробация на резултатите

Ninth International Conference on Radiation in Various Fields of Research (Rad 2021)

14–18.06.2021, Hunguest Hotel Sun Resort, Herceg Novi, Montenegro

Tsanev I., Pavlov B., Petkov P., Litov L. (2021) Investigation of the applicability to study the FLASH effect with protons on LINAC-4 accelerators at CERN and with carbon ions on NUCLOTRON at JINR (Dubna). BOOK OF ABSTRACTS – RAD 2021 Conference., <https://doi.org/10.21175/rad.abstr.book.2021.18.6>

3rd European Congress of Medical Physics – ECMP 2020 – Torino, Italy – postponed to June 16–19, 2021 – virtual edition

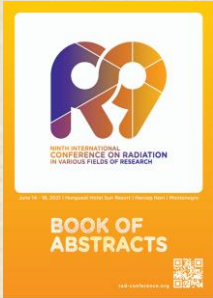
Tsanev I., Dimitrova S., Pavlov B., Petkov P., Yordanova V., Litov L. (2021) P99 - GEANT4 simulation study of the feasibility of LINAC 4 (CERN) and Nuclotron (JINR) accelerators to provide beams suitable for investigation of FLASH therapy mechanism, *Physica Medica*, **92** (Supplement) pp S187, ISSN 1120-1797, [https://doi.org/10.1016/S1120-1797\(22\)00401-X](https://doi.org/10.1016/S1120-1797(22)00401-X)

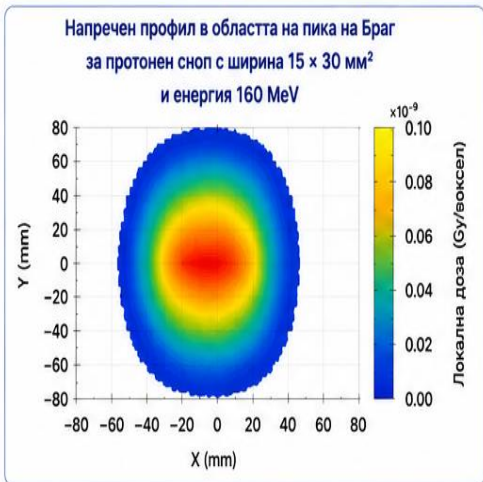
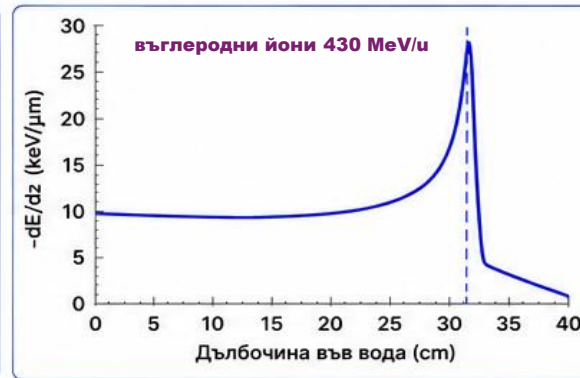
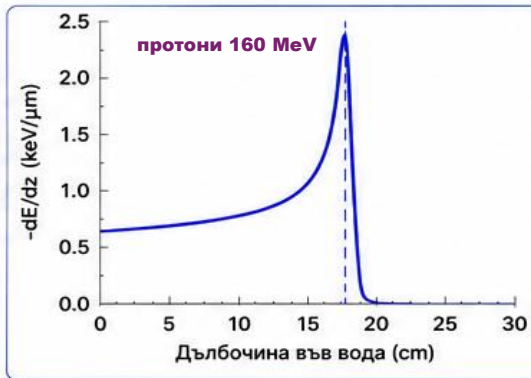
3rd European Congress of Medical Physics – ECMP 2020 – Torino, Italy – postponed to June 16–19, 2021 – virtual edition

Tsanev I., Todorova Ts., Vladimirov B., Dimov A. (2021) P237 - Conversion coefficients for estimation of effective dose from Kerma area product during x-ray radiography of pelvis and abdomen. *Physica Medica* **92**(Supplement) pp S250-251, ISSN 1120-1797 [https://doi.org/10.1016/S1120-1797\(22\)00542-7](https://doi.org/10.1016/S1120-1797(22)00542-7)

XIII National Medical Physics and Biomedical Engineering Conference: NMPEC-2020

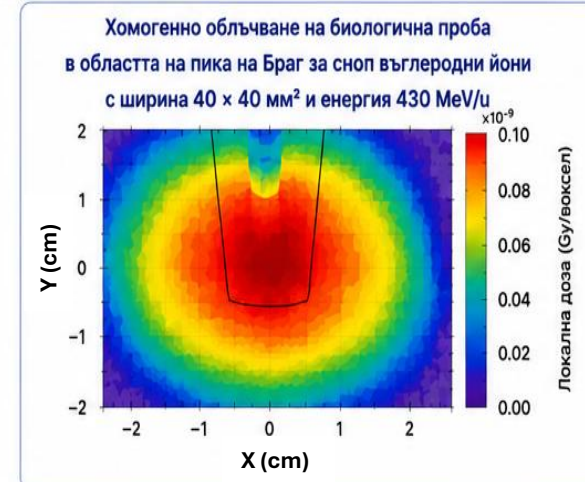
Tsanev I., Dimitrova S., Pavlov B., Petkov P., Yordanova V., Litov L., Prospects for study flash effect whit protons and heavy ions respectively on CERN LINAC-4 accelerator and Nuclotron at Dubna, *XIII National Medical Physics and Biomedical Engineering Conference: NMPEC-2020, Folia Medica* **62**(3): pp 18. <https://doi.org/10.3897/folmed.62.e60412>



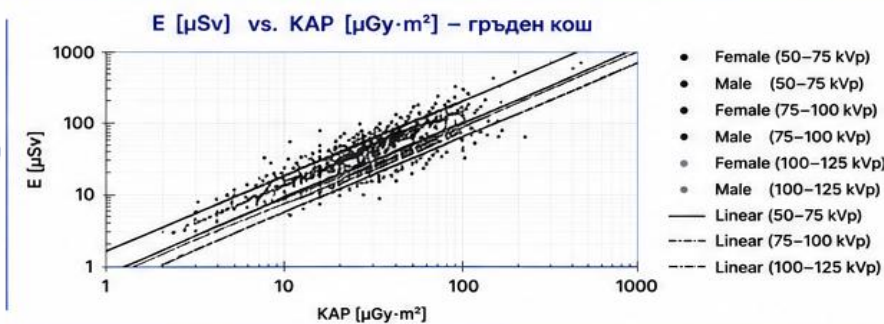
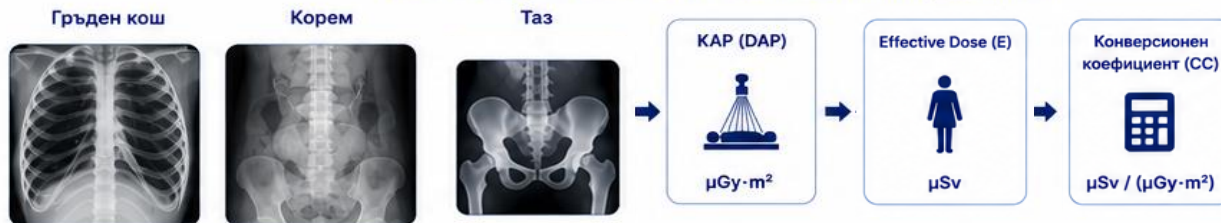


Благодаря за вниманието!

С удоволствие ще отговоря на Вашите въпроси.



Оценка на ефективната доза в диагностичната радиология



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА АТОМНА ФИЗИКА



GEANT4
SIMULATION TOOLKIT



FLUKA
MONTE CARLO CODE



PCXMC
DOSIMETRY CODE



CERN
LINAC4
Протони



JINR DUBNA
НУКЛОТРОН
Въглеродни йони