РАДИОХЕМИЈА И НУКЛЕАРНА ХЕМИЈА

ОБАВЕЗНИ ПРЕДМЕТ ТРЕЋЕ ГОДИНЕ ОАС

Материјал за школу хемије

РАДИОХЕМИЈА И НУКЛЕАРНА ХЕМИЈА

ОБАВЕЗНИ ПРЕДМЕТ ТРЕЋЕ ГОДИНЕ ОАС

- Наставник: др Марко Даковић, ванр. професор
- Асистент: Стефана Дејковић мастер физ. хем.
- Технички сарадник: Марко Брашњевић

Број часова активне наставе	Предавања	Вежбе
7	3	4
	2+1	

- Контакти
  Кабинет: 273

  marko@ffh.bg.ac.rs
  stefana@ffh.bg.ac.rs
  marko.brasnjevic@ffh.bg.ac.rs

Информације о предмету:

- http://ffh.bg.ac.rs/predmeti/radiohemija-i-nuklearna-hemija
- radiohemija.ffh.bg.ac.rs (+станица за обавештења)
- MS Teams
- Google Classroom

Fakultet za fizičku hemiju

ПЛАН ПРЕДАВАЊА

ОСНОВЕ	Увод у Радиохемију и нуклеарну хемију	ПРИМЕНЕ	Нуклеосинтеза
	Језгра, изотопи. Стабилност језгара		Космичко зрачење и природна радиоактивност
	Нестабилна језгра: радиоактивнии распади		Трансурански елементи
	Пролаз зрачења кроз материју		Нуклеарна енергетика
	Детекција и мерење радиоактивног зрачења		Нуклеарни и термонуклеарни реактори
	Дозиметрија јонизујућег зрачења		Нуклеарни горива циклус
	Наставни колоквијум 1		Изотопско обогаћивање
МОДЕЛИ	Енергија везе у језгру. Модели језгра.		Производња радиоизотопа и примене
	Теорија α и β распада		Хемија “врућих” атома
	Нуклеарне реакције		Примене радиоизотопа
	Теорија фисије и фузије		Елементарне честице
	Акцелератори		Наставни колоквијум 3
	Наставни колоквијум 2		

Fakultet za fizičku hemiju

ПРОГРАМ КОЛОКВИЈУМА И ВЕЖБИ

1. колоквијум
   - В1. Одређивање карактеристика Гајгер-Милеровог бројача
   - В2. Одређивање времена полираспада графичком методом и методом мерења апсолутне активности
   - В3. Одређивање енергије β и γ зрачења методом самоапсорпције
   - В4. Одређивање енергије γ зрачења сцинтилационим спектрометром

2. Колоквијум
   - В1. Одређивање количине микрокомпоненте у узорку методом активационе анализе
   - В2. Радиоимунолошка анализа (РИА) хормона штитне жлезде

3. Колоквијум
   - В1. Одвајање радиоактивног $^{56}MnO_2$ из $KMnO_4$ озраченог неутронима
   - В2. Идентификација природно присутних радионуклида у земљишту коришћењем HP Ge γ спектрометрије
   - В3. Раздвајање ^{90}Sr и ^{90}Y у микроконцентрацијама употребом катјонске смоле

Литература: М.Даковић, М. Мојовић, Практикум из радиохемије, Београд 2023.

Факултет за физичку хемију

ЛИТЕРАТУРА НА СРПСКОМ ЈЕЗИКУ

- X. J. Арникар, Основи нуклеарне хемије, Факултет за физичку хемију, Београд, 1992.
- Иван Драганић ед. Радиоактивни изотопи и зрачења, Научна књига, Београд, 1968.
- M. Haissinsky, Нуклеарна хемија и њене примене, Научна књига, Београд, превод са француског
- Ш. Миљанић, Нуклеарна хемија-скрипта
- Поглавља (на веб страници предмета):
  - Модели језгра и радиоактивних распада
  - Акцелератори
  - Елементарне честице и интеракције

Fakultet za fizicku hemiju

ЛИТЕРАТУРА НА ЕНГЛЕСКОМ ЈЕЗИКУ

- *Gregory Chopin et al., Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Elsevier, London, 4th ed 2013.*
- *W. D. Loveland, D. J. Morrissey, G. T. Seaborg, Modern Nuclear Chemistry, John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.*
- *J-V. Kratz, K. H. Lieser Nuclear and Radiochemistry: Fundamentals and Applications, 3rd Edition, Wiley KAH, Weinheim*

Fakultet za fizičku hemiju

БОДОВАЊЕ

<table>
<tr><th>Предиспитне обавезе</th><th colspan="2">Поени</th><th>Завршни испит</th><th>Поени</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Активност у току предавања</td><td rowspan="2">5</td><td>2,5</td><td rowspan="2">Наставни колоквијуми</td><td>19</td></tr>
<tr><td>2,5</td><td>18</td></tr>
<tr><td>Практична настава</td><td colspan="2">10 + 10</td><td></td><td>18</td></tr>
<tr><td>Колоквијуми</td><td colspan="2">20</td><td>Усмени испит</td><td>55</td></tr>
</table>

Fakultet za fizičku hemiju

ПОЛАГАЊЕ ИСПИТА

- На испит можете изаћи ако имате положене све испите из прве године, положене колоквијуме и одрађене вежбе, те минимум 50% присуства предавањима (Статут Факултета – 70%)
- Начини полагања испита:
  - Усмено (цео испит)
  - Преко три наставна колоквијума (усмено). Положен наставни колоквијум важи док не положите цео испит
  - Усмено, из три дела, при чему једном положен део испита важи док не положите цео испит. Делови испита се морају полагати редом. Други и трећи део испита је могуће полагати заједно.

Fakultet za fizičku hemiju

ЧЕСТО ПОСТАВЉАНА ПИТАЊА

- Слушао/ла сам предмет у претходним школским годинама и испунио услов за присуство на предавањима. Да ли је потребно да поново слушам предавања?
- Положио/ла сам колоквијуме, одрадио и оверио вежбе. Да ли је потребно да поново полажем колоквијуме и радим вежбе?
- Нисам положио/ла све колоквијуме, али сам оверио/ла извештаје од вежби које сам урадио/ла. Да ли морам да поново радим све вежбе?
- Да ли потребно да одрадим све вежбе после једног колоквијума, да бих полагао/ла наредни колоквијум?

Fakultet za fizičku hemiju

КРАТКА ИСТОРИЈА РАДИОХЕМИЈЕ

Fakultet za fizičku hemiju

ДЕФИНИЦИЈЕ...

- Радиохемија је наука која проучава природу и својства радиоактивних елемената и производа њиховог распада. (Cameron 1910, Soddy 1911)

- Радиохемија је област (физичке) хемије, која проучава хемију радиоактивних изотопа, елемената и једињења, њихових физичкохемијских својстава, хемију нуклеарних реакција и пратећих физичкохемијских процеса. (Несмеянов)

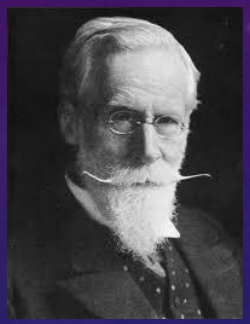
- Нуклеарна хемија проучава (Seaborg):

  - хемијске и физичке особине најтежих елемената
  - нуклеарне особине као што су структура, реакције и радиоактивни распад
  - макроскопске феномене (као што су геохронологија и астрофизика) који зависе од нуклеарних процеса

Fakultet za fizičku hemiju

ПРЕДИСТОРИЈА...

- Експерименти са проласком струје кроз гасове под ниским притиском
  - Гајслерова (Geissler) цев 1857.
  - Круксова (H. Crookes) цев – 1878.



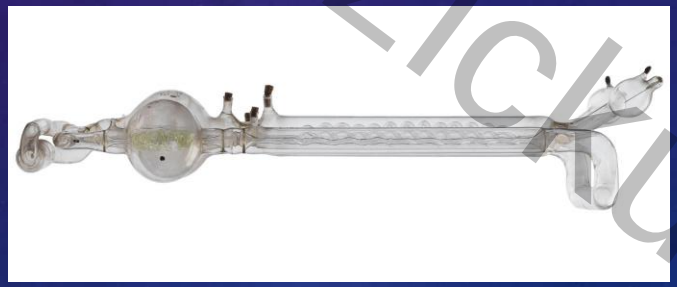
Sir William Crookes



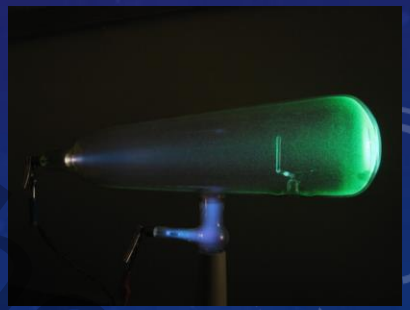
Crookes-ова цев



Rumkoff индуктор

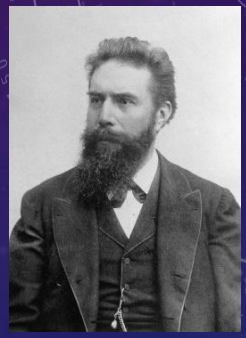


Geissler-ова цев

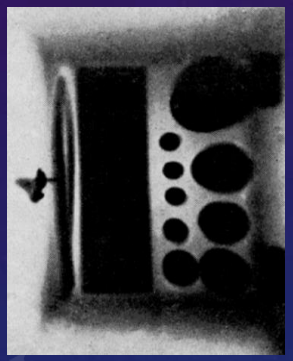


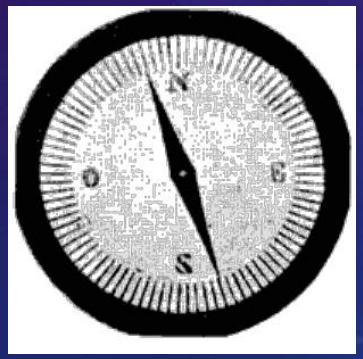
Fakultet za fiziku i hemiju

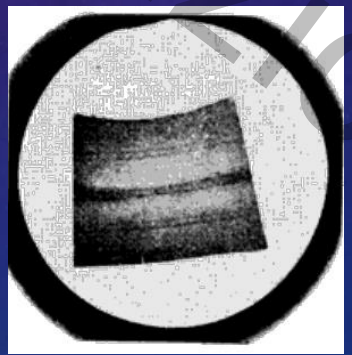
ОТКРИЋЕ Х-ЗРАКА

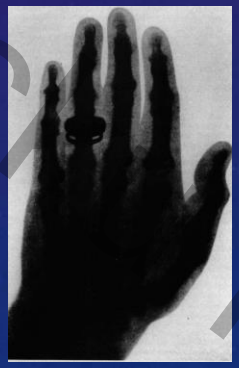


- W. C. Röntgen 28. 12. 1895.
- „Стога сам дошао до закључка да Х-зраци нису идентични са катодним зрацима већ их производе катодни зраци у стакленом зиду апарата за пражњење.



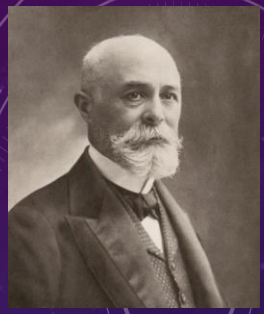







EINE NEUE ART
VON
STRAHLEN.
VON
DR. W. RÖNTGEN,
O. O. PROFESSOR AN DER K. UNIVERSITÄT WÜRZBURG.
WÜRZBURG.
VERLAG UND DRUCK DER STAHEL'SCHEN K. HOF- UND UNIVERSITÄTS-BUCH- UND KUNSTHANDLUNG.
Ende 1895.

ОТКРИЋЕ РАДИОАКТИВНОСТИ



- ***Antoine Henri Becquerel 1. 03. 1896.***
- ***Експерименти – озрачивање сунчевом $K_2UO_2(SO_4)_2*2H_2O$* светлошћу***
- ***Прво саопштење 24. 02. 1896.***

PHYSIQUE. — *Sur les radiations émises par phosphorescence.* Note de M. HENRI BECQUEREL.

- *"Лимијерова фотографска плоча са бромидном емулзијом умота се у два листа веома дебелог црног папира, тако да се избегне замагљивање плоче услед излагања сунцу. Постави се лист папира и на њега плочица од флуоресцентне супстанције и све се то изложи сунчевој светлости у трајању од неколико часова"*
- *" Када се фотографска плоча развије, уочава се силуета фосфоресцентне супстанције као зацрњење на негативу. "*
- *"Из ових експеримената се може извести закључак да фосфоресцентна супстанца у питању емитује зраке који пролазе кроз непрозиран папир и редукују соли сребра. "*

**Формула по Бекерелу је била $[SO^4(UO)K + H^2O]$*



Друго саопштење 2. 03. 1896.

PHYSIQUE. — *Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents.* Note de M. HENRI BECQUEREL.

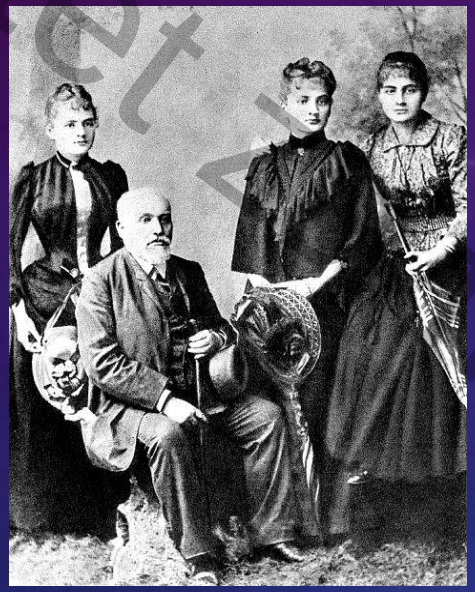
- *"Посебно ћу инсистирати (истаћи) на следећој чињеници, која ми се чини веома значајна и која је изнад феномена за који се могу очекивати: Иста кристална кора, постављена на исти начин у односу на фотографску плочу, под истим условима и кроз исти прозор, али заштићена од ексцитације упадних зрака и чувана у мраку, и даљњ производи исте фотографске слике. Следеће околности су ме водиле ка наведеним запажањима: између претходних експеримената, неки су били припремљени у среду 26-тог и четвртак 27-ог фебруара и пошто се Сунце само повремено појављивало тих дана, сачувао сам припремљене апаратуре и вратио кутије у таму писаћег стола, са плочицом (кором) уранијумове соли на њима. Како се Сунце није појављивало у следећим данима, 1. марта сам развио плоче, очекујући појаву само веома слабих слика. Уместо тога појавиле су се силуете великог интензитета."*

- *"Важно је приметити да изгледа да се овај феномен не може приписати светлосном зрачењу емитованом фосфорсценцијом, пошто она на крају стотог дела секунде постаје тако слаба да се више не може запазити."*

- *"Хипотеза која се природно намеће би била претпоставка да су ови зраци, чије дејство има (показује) велику сличност са зрацима проучаваним од стране господина Ленарда и господина Рентгена, невидљиви зраци емитовани фофоресценцијом и да опстају много (бесконачно) дуже од светлосних зрака емитованих од стране ових објеката."*

MARIA SKLODOWSKA









Fakultet za fiziku i hemiju

MARIE SKLODOWSKA-CURIE & PIERRE CURIE

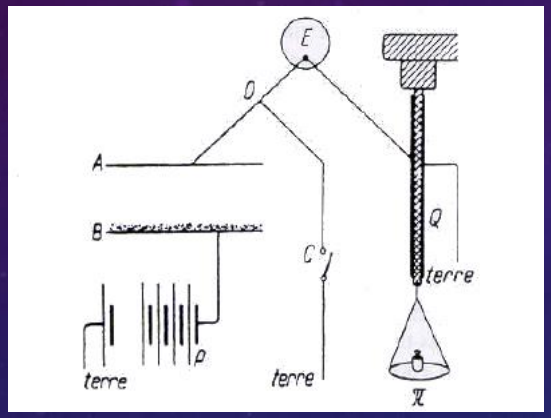
- 1891-1894. Сорбона, студије физике и математике
- 1894-1897. Истраживања везана за магнетне особине метала и легура
- 1895. удаје се за Пјера Кирија



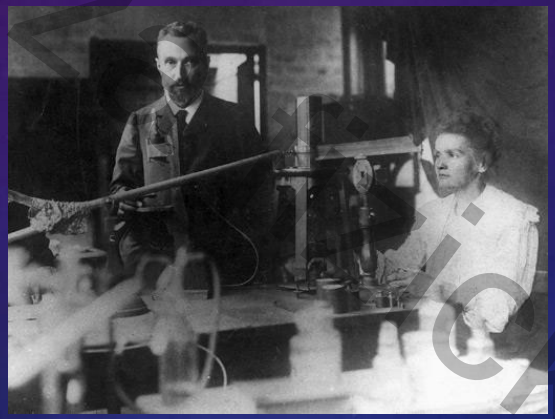


ИСТРАЖИВАЊА ВЕЗАНА ЗА БЕКЕРЕЛОВЕ (УРАНИЈУМСКЕ) ЗРАКЕ

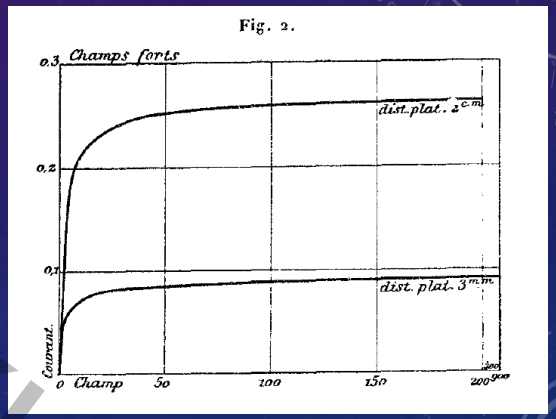
- 1898. почетак истраживања везаних за зрачење из уранијумових једињења и минерала



Пиезоелектрична вага



М. Кири користи пиезо вагу



Мерење сатурационе струје

PHYSIQUE. — *Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium.* Note de M^me^ SKLODOWSKA CURIE (¹), présentée par M. Lippmann.

	$i \times 10^{11}$.
Uranium métallique (contenant un peu de carbone)	2,3
Oxyde d'urane noir U^2O^5	2,6
Oxyde d'urane vert U^3O^4	1,8
Acide uranique hydraté	0,6
Uranate de sodium	1,2
Uranate de potassium	1,2
Uranate d'ammonium	1,3
Sulfate uraneux	0,7
Sulfate d'uranyle et de potassium	0,7
Azotate d'uranyle	0,7
Phosphate de cuivre et d'uranyle	0,9
Oxysulfure d'urane	1,2

Сатурационе струје уранијумових једињења

	$i \times 10^{11}$.
Uranium	2,3
Pechblende de Johanngeorgenstadt	8,3
» de Joachimsthal	7,0

	$i \times 10^{11}$.
Pechblende de Pzibran	6,5
» de Cornwallis	1,6
Clévéite	1,4
Chalcolite	5,2
Autunite	2,7
Thorites diverses	0,1; 0,3; 0,7; 1,3; 1,4
Orangite	2,0
Monazite	0,5
Xenotime	0,03
Aeschynite	0,7
Fergusonite, 2 échantillons	0,4; 0,1
Samarskite	1,1
Niobite, 2 échantillons	0,1; 0,3
Tantalite	0,02
Carnotite (¹)	6,2

Сатурационе струје уранијумових минерала

RECHERCHES SUR LES

SUBSTANCES RADIOACTIVES.

THÈSE PRÉSENTÉE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES;

PAR

M^me^ SKLODOWSKA CURIE.

DEUXIÈME EDITION, REVUE ET CORRIGÉE.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1904

Докторска дисертација Марије Кири

Fakultet za fizičku hemiju

ЗАКЉУЧЦИ ИСТРАЖИВАЊА СА АКТИВНОШЋУ УРАНИЈУМОВИХ МИНЕРАЛА

- “Сва проучавана уранијумова једињења су активна, и генерално су, активнија су што садрже више уранијума.”
- “Једињења торијума су веома активна. Торијум оксид по активности чак премашује метални уранијум.”

- “Сви минерали који показују активност садрже активне елементе. Два минерала уранијума, пехбленда и чалколит су много више активни него сам уранијум. Ова чињеница је посебно значајна и сугерише да ови минерали могу садржати елемент много активнији од уранијума.”

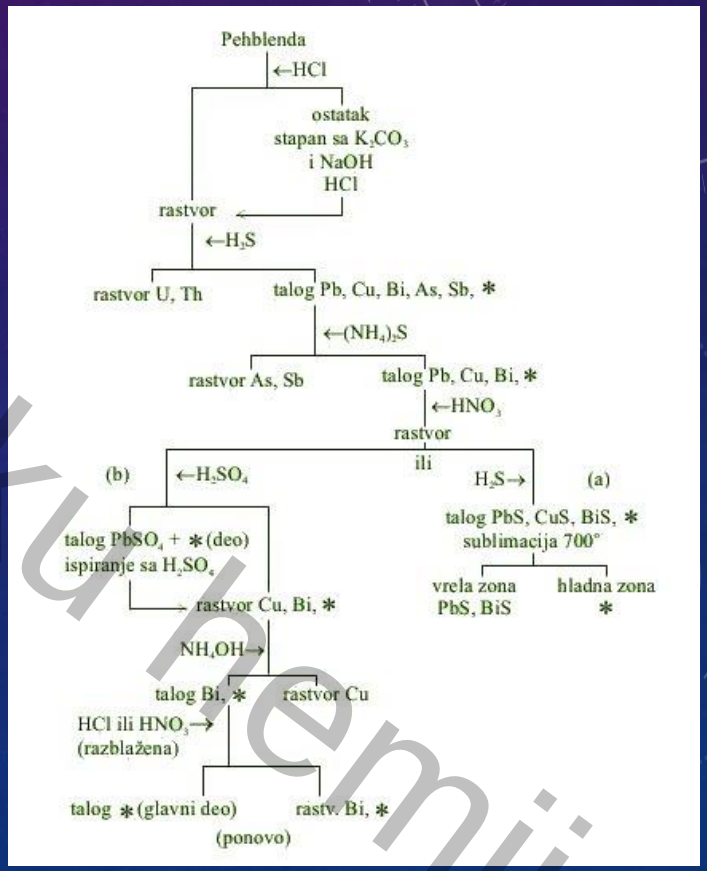
Fakultet za fizičku hemiju

ОТКРИЋЕ ПОЛОНИЈУМА

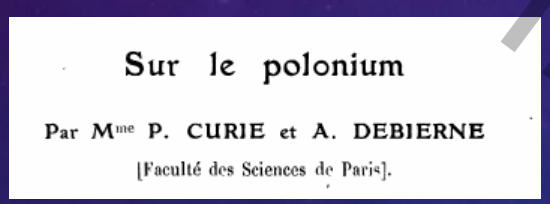
PHYSICO-CHIMIE. — *Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende* (¹). Note de M. **P. Curie** et de M^me **S. Curie**, présentée par M. Becquerel.

- “Настојали смо да изолујемо ову супстанцију из пехбленде и експеримент је управо потврдио раније претпоставке.”

- “Наша хемијска истраживања су се константно одвијала уз проверу радијантне активности одвојених продуката у току поступка. Сваки производ је постављан на једну од плоча кондензатора и проводљивост створена у ваздуху је мерена помоћу електрометра и пиезоелектричног кварца (као у претходном раду)”



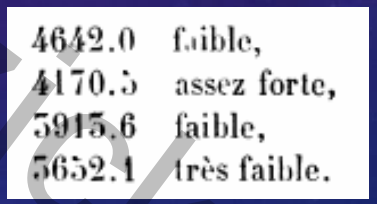
- “Верујемо стога да супстанција коју смо издвојили из пехбленде садржи метал чије постојање још није објављено и који је по својим аналитичким особинама близак бизмуту. Ако се потврди постојање овог новог метала, предлажемо да се зове полонијум по имену земље из које једно од нас потиче.”
- 1910 снимљен атомски спектар полонијума



Sur le polonium

Par Mme P. CURIE et A. DEBIERNE

[Faculté des Sciences de Paris].



4642.0 faible,
4170.5 assez forte,
3913.6 faible,
3652.1 très faible.



Атомски емисиони спектар полонијума.

ОТКРИЋЕ РАДИЈУМА



- “У току ових истраживања дошли смо до друге, јако радиоактивне супстанције, потпуно другачије по хемијским особинама од претходне” (*полонијума).
- “Нова радиоактивна супстанција коју смо управо открили има хемијску појаву скоро чистог баријума.”
- “Ипак ми вериујемо да је ова супстанција, иако у великом делу састављена од баријума, као додатак садржи нови елемент који одаје своју радиоактивност и који је уз то блиско повезан са баријумом и његовим хемијским особинама.”
- “Различити разлози које смо навели довели су нас до уверења да нова радиоактивна супстанција садржи нови елемент за који предлажемо да се зове радијум.”

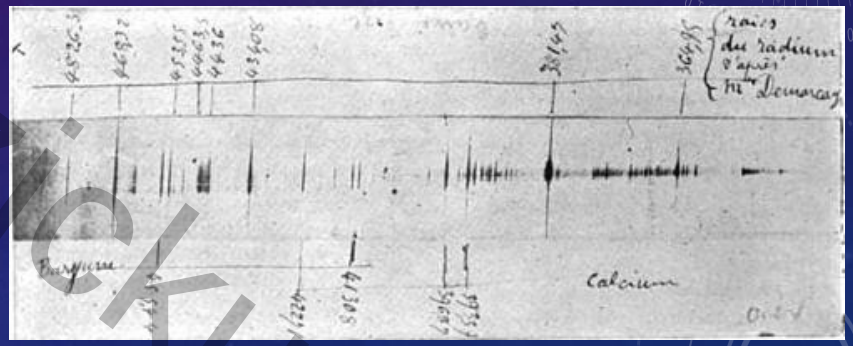
Fakultet za fizičku hemiju

ПОТВРДА ОТКРИЋА НОВОГ ЕЛЕМЕНТА

- Одређивање атомске масе радијума – изоловање чистог радијума из неколико тона отпада из прераде пехбленде. Чист радијум је изолован 20. 04. 1902.



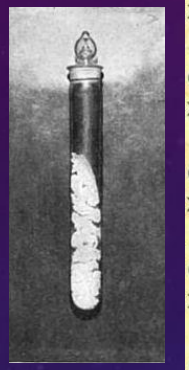
Лабораторија у којој је изолован радијум

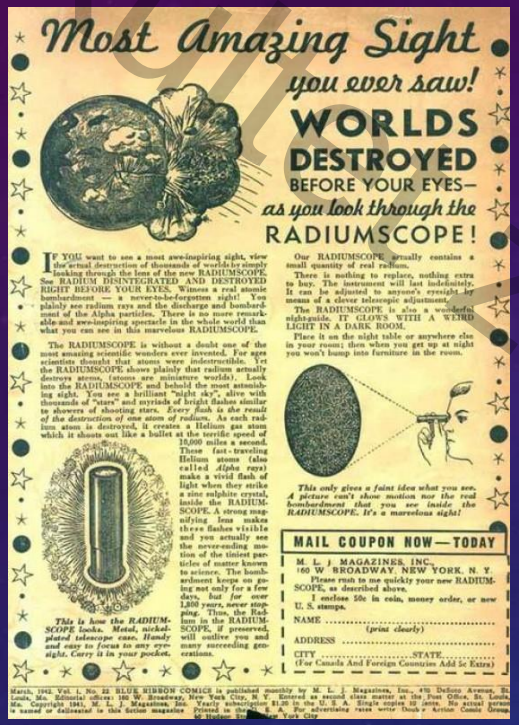


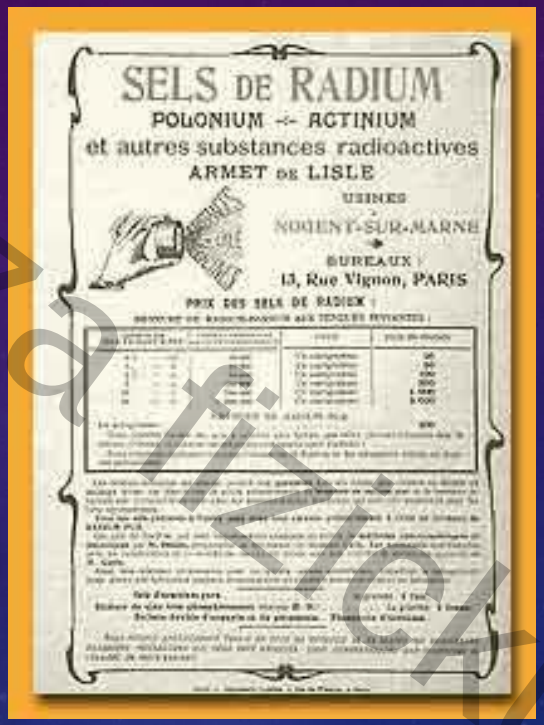
Атомски спектар радијума забележен од стране Марије Кири

Fakultet za fizičku hemiju

РАДИЈУМ!




Most Amazing Sight
you ever saw!
WORLDS
DESTROYED
BEFORE YOUR EYES—
as you look through the
RADIUMSCOPE!
IF YOU want to see a most awe-inspiring sight, view the actual destruction of thousands of worlds by simply looking through the lens of the new RADIUMSCOPE. See RADIUM DISINTEGRATED AND DESTROYED RIGHT BEFORE YOUR EYES. Witness a real atomic bombardment — a never-to-be-forgotten sight! You plainly see radium rays and the discharge and bombardment of the Alpha particles. There is no more remarkable and awe-inspiring spectacle in the whole world than what you can see in this marvelous RADIUMSCOPE.
The RADIUMSCOPE is without a doubt one of the most amazing scientific wonders ever invented. For ages scientists thought that atoms were indestructible. Yet the RADIUMSCOPE shows plainly that radium actually destroys atoms, (atoms are miniature worlds). Look into the RADIUMSCOPE and behold the most astonishing sight. You see a brilliant "night sky", alive with thousands of "stars" and myriads of bright flashes similar to showers of shooting stars. Every flash is the result of the destruction of one atom of radium. As each radium atom is destroyed, it creates a Helium gas atom which it shoots out like a bullet at the terrific speed of 10,000 miles a second. These fast-traveling Helium atoms (also called Alpha rays) make a vivid flash of light when they strike a zinc sulphite crystal, inside the RADIUMSCOPE. A strong magnifying lens makes these flashes visible and you actually see the never-ending motion of the tiniest particles of matter known to science. The bombardment keeps on going not only for a few days, but for over 1,200 years, never stopping. Thus, the Radium in the RADIUMSCOPE, if preserved, will outlive you and many succeeding generations.
This is how the RADIUMSCOPE looks. Metal, nickel-plated telescope case. Handy and easy to focus to any eyesight. Carry it in your pocket.
Our RADIUMSCOPE actually contains a small quantity of real radium.
There is nothing to replace, nothing extra to buy. The instrument will last indefinitely. It can be adjusted to anyone's eyesight by means of a clever telescopic adjustment.
The RADIUMSCOPE is also a wonderful night-guide. IT GLOWS WITH A WEIRD LIGHT IN A DARK ROOM.
Place it on the night table or anywhere else in your room; then when you get up at night you won't bump into furniture in the room.
This only gives a faint idea what you see. A picture can't show motion nor the real bombardment that you see inside the RADIUMSCOPE. It's a marvelous sight!
MAIL COUPON NOW—TODAY
M. L. J. MAGAZINES, INC.,
160 W. BROADWAY, NEW YORK, N. Y.
Please rush to me quickly your new RADIUMSCOPE, as described above.
I enclose 50c in coin, money order, or new U. S. stamps.
NAME .....
(print clearly)
ADDRESS .....
CITY ..... STATE .....
(For Canada And Foreign Countries Add 5c Extra)


SELS DE RADIUM
POLONIUM -:- ACTINIUM
et autres substances radioactives
ARMET DE LISLE
USINES
NOGENT-SUR-MARNE
BUREAUX :
13, Rue Vignon, PARIS





РАДИЈУМ!

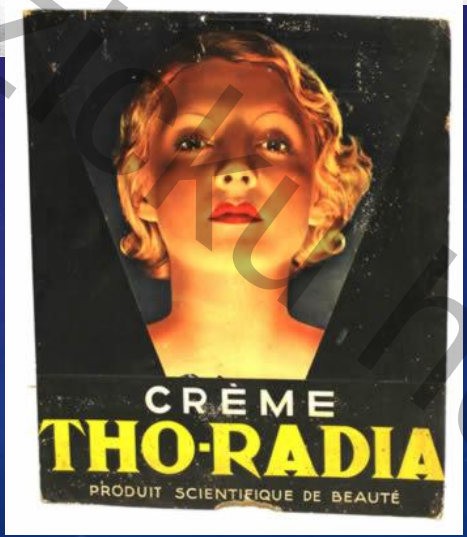






Радијумска вода





РАДИЈУМ-ПОСЛЕДИЦЕ





Пјер Кири је већ патио од радијационе болести када је погинуо у саобраћајној несрећи.

Марија Кири је 1934. умрла од апластичне анемије која је последица излагања великим дозама зрачења.

Fakultet za fizičku hemiju

ПРИЗНАЊА

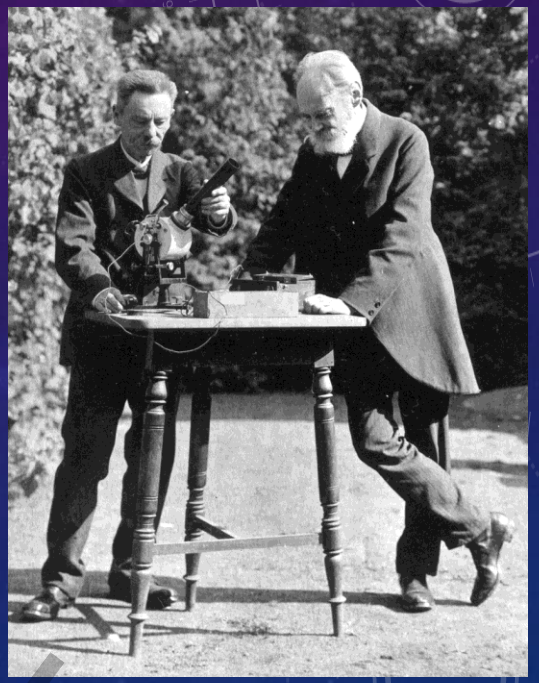
- **1903. Нобелова награда за физику заједно са Анри Бекерелом**
- **„Морамо се запитати да ли човечанство може имати користи од познавања сила природе или ће ово знање штетити свету“ P. Curie**
- **1912. Нобелова награда за хемију**





ОДАКЛЕ ПОТИЧЕ РАДИОАКТИВНОСТ?

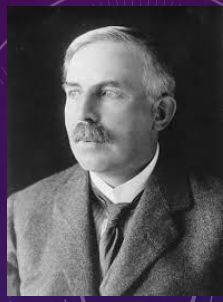
- Етер?
- Озрачивање сунчевом светлошћу?
- Експерименти Elster & Geitel-a
- Нешто у самим атомима “производи” радиоактивност.
- M. Curie: Радиоактивност је знак да тешки атоми еволуирају у различите облике



Elster & Geitel

Fakultet za fizicku hemiju

ШТА ЈЕ РАДИОАКТИВНО ЗРАЧЕЊЕ

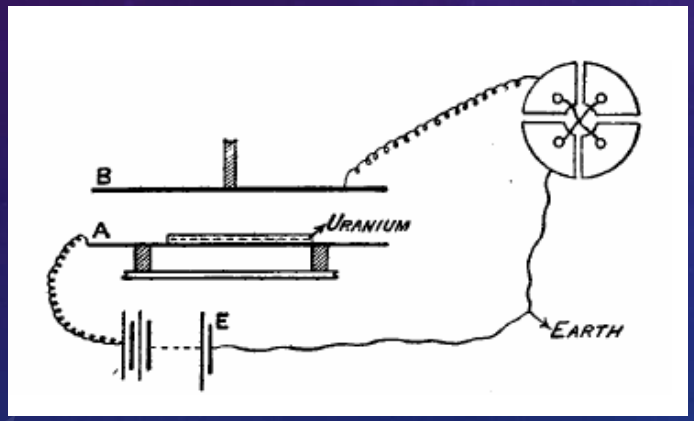


Ернест Ратерфорд је испитивао природу емисије из радиоактивних елемената U, Th и Ra преко њихове интеракције са различитим материјалима.

E. Rutherford, Philos. Mag. **47**, 109 1899

Uranium Radiation and the Electrical conduction Produced by it

E. Rutherford,
(Received September, 1st, 1898)



Квадрантни електрометар

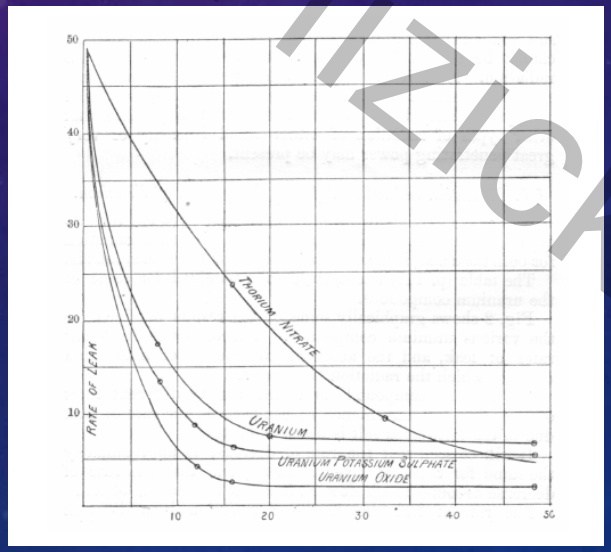
Number of Layers Of Aluminium foil	Leak per min. in scale–divisions	Ratio
0	182	
1	77	0.42
2	33	0.43
3	14.6	0.44
4	9.4	0.65
12	7	

Комплексна природа зрачења уранијума!

Fakultet za fizičku hemiju

Ернест Ратерфорд:

- Ови екперименти показују да је зрачење уранијума сложено, и да постоје најмање две различите врсте зрачења: једна која се веома лако апсорбује и која ће због једноставности бити названа α зрачењем, док ће друга која има већу продорност бити названа β зрачењем."
- "β зрачење је приближно хомогеног карактера"



Fakultet za fizičku hemiju

β ЗРАЧЕЊЕ

- Thompson: Катодни зраци су наелектрисане честице – “корпускуле”
- M. Curie (1899): Бекерелово (уранијумско) зрачење је састављено од делића материје.
- if (катодни зраци) = честице
  - then (Бекерелово зрачење) = честице ?
  - else (X-зрачење)
  - endif

- Скретање наелектрисаних честица у магнетном/електричном пољу → потврда

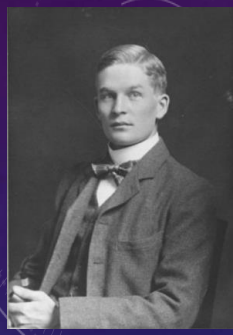
Факултет за физичку хемију

“ИНДУКОВАНА” РАДИОАКТИВНОСТ

- Радиоактивност стална и непроменљива?
- R. B. Owens: Зрачење из ThO_2 зависи од струјања ваздуха ?!
- Rutherford: “еманација”
- Све што је “еманација” додирнула постајало је радиоактивно ?!!
- Радиоактивност “еманације” опада са временом !
- Dorn 1900. “и радијум има еманацију”
- Радиоактивност уранијума и торијума потиче од нечистоћа?

Fakultet za fizičku hemiju

ALCHEMY REVISITED

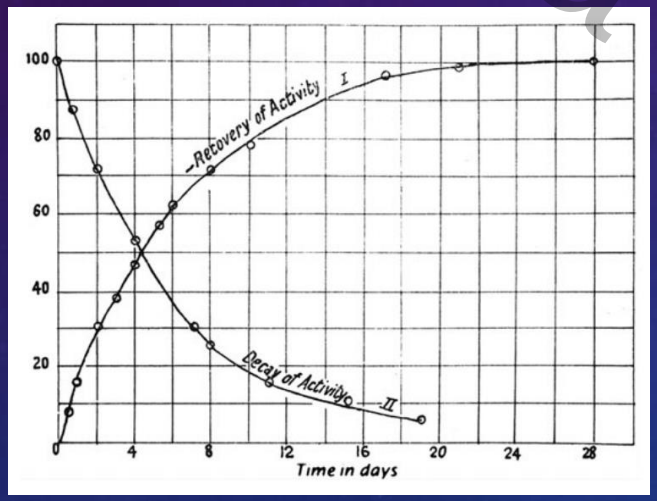

F. Soddy

- Експерименти Rutherford-Soddy
- “Еманација” није хемијски реактивна –инертни гас.
- Soddy: “Rutherford, this is transmutation: the thorium is disintegrating and transmuting itself into an argon gas.”
- Rutherford: “For Mike’s sake, Soddy, don’t call it transmutation. They’ll have our heads off as alchemists.”

Fakultet za fizičku hemiju

НОВА АЛХЕМИЈА

- Soddy – екстракција ThX из торијум оксида-остатак неактиван.
- Giesel: Свеже изоловани радијум у почетку добија на активности



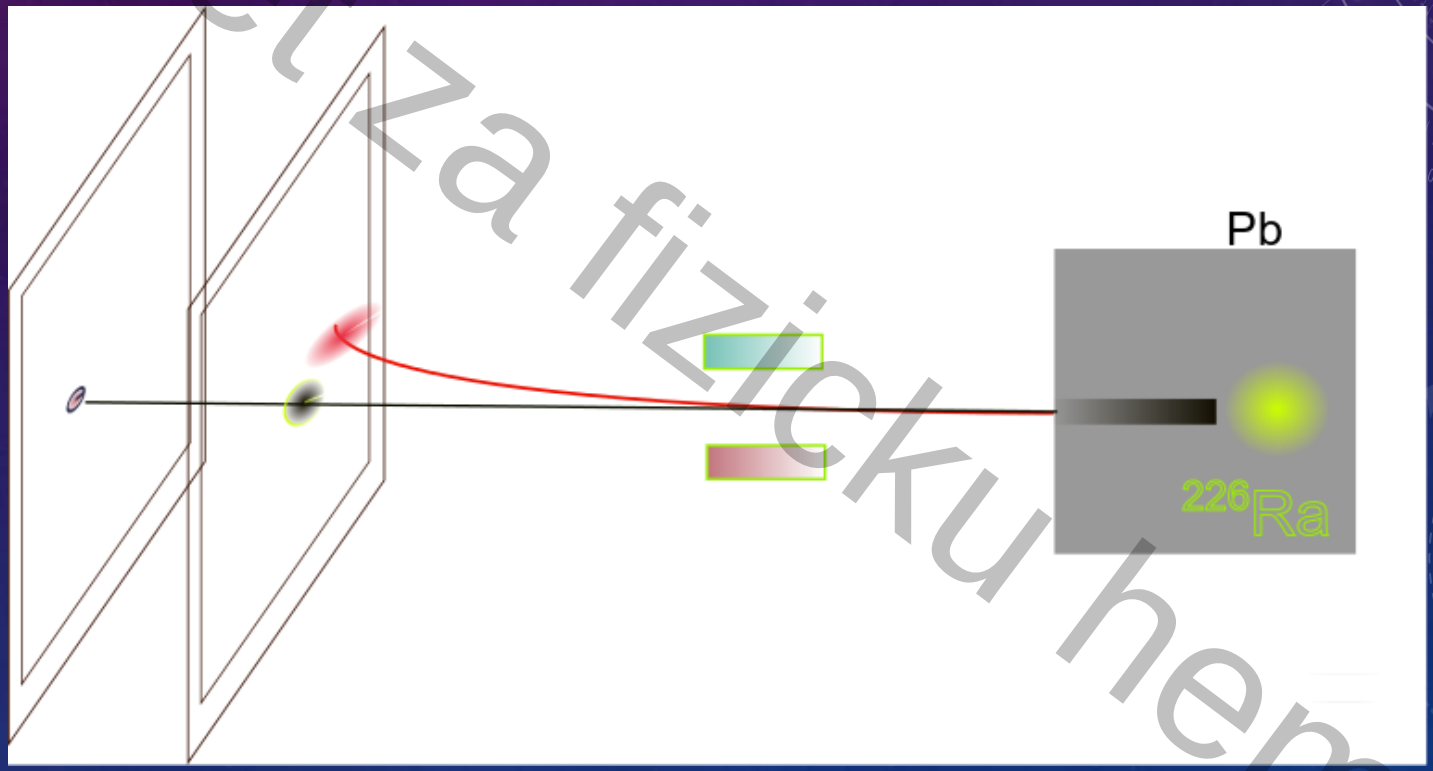
Трансмутација!

Радиоактивни распад!

Fakultet za fiziku i hemiju

ОТКРИЋЕ γ ЗРАКА

- Paul Villard 1900.



Fakultet za fizičku hemiju

ОСТАЛА ВАЖНИЈА ОТКРИЋА ИЗ ОБЛАСТИ НУКЛЕАРНИХ НАУКА

1905	Einstein формулише $E=mc^2$
1911	Rutherford, Geiger & Marsden – атомско језгро
1912	Wilson-маглена комора за детекцију честица
1913	Hess- космичко зрачење
1913	Soddy, радиоактивне серије, појам изотопа
1919	Rutherford - прва нуклеарна реакција у лабораторијским условима
1921	Hahn – нуклеарна изомерија
1924	de Broglie- дуалистичка природа материје
1925-1927	Паулијев принцип, Шредингерова једначина
1928	Geiger-Muller детектор
1932	Chadwick – откриће неутрона
1934	I & F. Jolio-Curie- вештачка радиоактивност
1938	Hahn-Strassman – откриће фисије

Fakultet za fizicku hemiju