

Ուսուցման գործընթացում ֆիզիկայի արդի նվաճումների հանրամատչելի ներկայացման մեթոդալուծական որոշ մոտեցումների մասին

Ներածություն

Ներկայումս ֆիզիկան զարգանում է սրընթաց և շատ ավելի մեծ արագությամբ, քան նախորդող դարաշրջաններում: Վերջինս պայմանավորված է բազմաթիվ գործոններով, որոնցից են աշխարհում գիտությամբ զբաղվողների քանակի աճը, արդի տեխնոլոգիաների զարգացման շեշտակի աճող պահանջները, համակարգչային տեխնիկայի ընձեռած հաշվողական հսկայական նոր հնարավորությունները: Գիտության աճին մեծապես նպաստում է նաև գիտական տեղեկատվության հասանելիությունն ու աշխարհում որևէ գիտական նորույթի շատ արագ տարածման ներկայիս հնարավորությունները:

Ժամանակակից ֆիզիկան զբաղվում է այնպիսի հարցերով և խնդիրներով, որոնց մասին անգամ դժվար էր պատկերացնել նախկինում՝ նույնիսկ գիտական ֆանտաստիկայի ժանրում: Տեսական հետազոտություններն արդեն ընդգրկում են տարածության 10^{-35} – 10^{27} մ և ժամանակի 10^{-44} – 10^{16} վ տիրույթներում ընթացող ֆիզիկական երևույթներ և փորձարարական ֆիզիկան էլ իր հերթին գրանցում է նորանոր հետաքրքիր արդյունքներ, մշտապես լայնացնելով իր հետազոտման դաշտը և միաժամանակ ստանում է ամենատարբեր կիրառություններ արդյունաբերության մեջ և մարդկային գործունեության տարբեր ոլորտներում:

Պարզ է, որ կրթական ծրագրերի փոփոխությունների դինամիկան պետք է ընթացս արձագանքի գիտության արագ աճին և ուսուցանվող նյութն էլ չպետք է «հետ ընկնի» աշխարհի ֆիզիկական պատկերի ներկայիս ընկալումներից: Ցավոք, ֆիզիկայի նորագույն նվաճումների հանրամատչելի ներկայացումը թե բուհում և թե դպրոցում ոչ լիարժեք է, ինչը լուրջ խոչընդոտ է սովորողների մոտիվացիայի, ուսուցման արդյունավետության բարձրացման համար, մինչդեռ ակնհայտ է, որ այն ոչ միայն ուսուցմանը նպաստող և խթանող լավագույն միջոցներից է, այլև հենց ուսուցման պրոցեսի կարևոր ու անբաժանելի մասն է: Ներկայումս ստացվել է այնպիսի իրավիճակ, երբ սմարթ հեռախոսներից և համակարգիչներից օգտվող երեխաներին ֆիզիկայի դասերին հիմնականում

առաջարկում ենք լուծել խնդիրներ, որոնց ուսումնասիրման օբյեկտները ավազը, չորսուն և սնդիկն են: Նման մոտեցումը մեր կարծիքով չի կարող չառաջացնել հետաքրքրության անկում ֆիզիկայի նկատմամբ: Սույն աշխատանքում վեր հանելով կրթական գործընթացում գիտության արդի նվաճումների հանրամատչելի ներկայացման կարևորությունը ինչպես նաև գիտության մասսայականացման դերը, կոնկրետ օրինակների միջոցով ուղենշելու ենք դրանց իրականացման որոշ մեթոդոլոգիական ուղիներ, մատնանշելով ինչպես այդ գործընթացի իրականացման պրոցեսում առկա դժվարությունները, այնպես էլ վերջիններիս հաղթահարման հնարավոր ճանապարհները, ինչն էլ հանդիսանում է աշխատանքի գիտամեթոդական նորույթը:

**Ֆիզիկայի գիտական արդի նվաճումների հանրամատչելի ներկայացման
մեթոդոլոգիական որոշ մոտեցումներ. առկա դժվարություններ և հաղթահարման
ուղիներ**

Ժամանակակից ֆիզիկական տեսությունների և գաղափարների հանրամատչելի ներկայացումը բախվում է մի շարք պրոբլեմների: Հիմնական ակնհայտ դժվարությունը պայմանավորված է դրանց բարդությամբ, ինչը թույլ չի տալիս վերջիններիս ուղղակիորեն մատուցումը սովորողին: Ի տարբերություն ֆիզիկայի դասական տեսությունների, այստեղ գիտական իրողությունից ուսումնական նյութի ստացումն ու մշակումը շատ ավելի դժվար աշխատանք է: Այլ կերպ ասած արդի ֆիզիկական բավականին բարդ է դպրոցում և բուհում ուսուցանելու և հանրայնացնելու համար: Հաջորդ դժվարությունը պայմանավորված է ժամանակակից ֆիզիկական գաղափարների մի մասի դեռևս լիարժեք ձևավորվածության բացակայության և հիպոթեթիկ բնույթ կրելու մեջ, ինչը նպատակահարմար չի դարձնում դրանց սիստեմատիկ ուսուցումը: Սակայն նման դեպքերում ևս ցանկալի է, որ սովորողը ծանոթանա և առնչվի այդ գաղափարներին ոչ միայն ինֆորմացիայի տարբեր աղբյուրներից, այլ հենց ուսուցման ընթացքում, երբ դասավանդողը կարող է օգնել նրան ճիշտ կողմնորոշվելու նման հարցերում և խուսափելու թյուր կարծիքների ձևավորումից: Ֆիզիկայի ժամանակակից ձեռքբերումների ծանոթացմանը օբյեկտիվորեն խոչնդոտում է նաև այն, որ ուսումնական լաբորատորիաների հին, պարզունակ և սահմանափակ միջոցները հնարավորություն չեն տալիս թեկուզ ընդհանուր պատկերացում կազմել արդի գիտական լաբորատորիաներում կատարվող բարդ և ճշգրիտ փորձերի մասին:

Ստորև կներկայացնենք մեթոդոլոգիական մոտեցումներ և դրանք լուսաբանող համապատասխան մասնավոր օրինակներ, որոնք կարող են կիրառվել արդի ֆիզիկական գաղափարները աշակերտին և ուսանողին որոշ չափով հասանելի դարձնելու համար:

Երևույթը, թեկուզ ոչ լիարժեք խստությամբ և ճշտությամբ փորձել բացատրել սովորողներին ծանոթ ֆիզիկական տեսությունների շրջանակներում: Այնուհետև բացատրել, որ ներկայացվածը ունի բացեր, որոնք արդեն չկան երևույթի առավել ճշգրիտ տեսության շրջանակում քննարկման դեպքում: Այս մոտեցումը հնարավորություն կտա ընդհանուր գաղափար կազմել դիտարկվող երևույթի մասին,

որի արդյունքում սովորողը առավել կարժեվորի ֆիզիկայի դասընթացից ձեռք բերած իր գիտելիքները: Նա կհասկանա, որ այս պահին իր իմացածը կարող է տալ ժամանակակից ֆիզիկայում դիտարկվող երևույթների որոշակի բացատրություններ (թեկուզ ոչ լիարժեք) և հետագայում, խորացնելով գիտելիքներն ու ծանոթանալով նոր տեսությունների, նա կկարողանա առավել լավ պատկերացնել ու ճշգրիտ բացատրել իրեն արդեն մասամբ ծանոթ այդ երևույթները: Հարկ է նշել, որ երբեմն հանդիպում ենք դեպքերի, երբ արդի ֆիզիկական տեսությունների շրջանակում կոռեկտ բացատրություն ունեցող երևույթը քանակապես գրեթե ճշգրիտ, կամ լրիվ ճշգրիտ կերպով նկարագրվում է նաև սովորողներին ծանոթ դասական տեսությունների շրջանակներում նույնպես: Ներկայացնենք նման մի օրինակ:

1799թ. սև խոռոչի հասկացության ընկալմանը եկավ ֆրանսիացի մաթեմատիկոս Լապլասը: Չնայած այն հանգամանքին, որ նմանատիպ օբյեկտների նկարագրության ժամանակ «սև խոռոչ» տերմինը Լապլասը չէր էլ կիրառում, պարզ է, որ նա դիտարկում էր հենց այն նույն դեպքը, երբ լույսի արագությունը հավասարվում է օբյեկտից անվերադարձ հեռացման արագությանը: Հարկ է նշել, որ ավագ դպրոցի 10-րդ դասարանի ֆիզիկայի դասընթացի [2] շրջանակում կարելի է լիովին ներկայացնել Լապլասի այս դատողությունները և ստանալ վերջնարդյունքը: Իրոք, անհրաժեշտ է միայն պահանջել, որ համաձայն էներգիայի պահպանման օրենքի սահմանային դեպքում լուսային մասնիկի կինետիկ էներգիան հավասար լինի նրա սև անցքի հետ փոխազդեցության պոտենցիալ էներգիային:

$$\frac{mc^2}{2} = G \frac{Mm}{R} :$$

Ստացվածից հետևում է, որ սև անցք լինելու համար M զանգվածով գնդի համար R շառավիղը չի կարող գերազանցել հետևյալ արժեքը՝

$$R_s = \frac{2GM}{c^2},$$

որտեղ c - ն լույսի արագությունն է, իսկ R_s - ը Լապլասյան սև խոռոչի շառավիղի կրիտիկական արժեքը: Ստացված արտահայտությունը լիովին համընկնում է Շվարցշիլդի շառավիղի արտահայտությանը, որը ստացվում է, երբ սև խոռոչը

քննարկվում է նման հարցերի համար ավելի ադեկվատ և ճշգրիտ տեսության, այն է՝ հարաբերականության ընդհանուր տեսության շրջանակներում:

Առանց ապացույցների աշակերտներին տրամադրել արդի ֆիզիկական տեսության այն անհրաժեշտ ֆիզիկական և մաթեմատիկական հիմնական գաղափարները, որոնք այնուհետև միջոցներ պիտի հանդիսանան այդ տեսության շրջանակում ուսումնասիրվող կարևոր և հետաքրքիր երևույթների ներկայացվելիք բացատրությունների և հիմնավորումների համար: Պատկերավոր ասած նշված ֆիզիկական և մաթեմատիկական գաղափարներն ու տեղեկույթը աշակերտին տրամադրում են որպես «գործիքներ» (որոնց էությանն ու աշխատանքի սկզբունքներին նա լիովին չի տիրապետում), ընդամենը տալով պատկերացում այդ «գործիքների» դերի, նշանակության և կիրառման մասին: Նման բազմաթիվ օրինակների հանդիպում ենք անվանի ֆիզիկոս և մանկավարժ, ակադեմիկոս Էդուարդ Ղազարյանի գիտամեթոդական հոդվածներում և գրքերում: Բերենք մեկ օրինակ:

Ֆիզիկայի դպրոցական դասընթացի շրջանակում քվանտային մեխանիկայի մասին տրվող հպանցիկ գաղափարները [4, էջեր 163-164] հնարավորություն չեն ընձեռում ներկայացնել այդ տեսության զանազան կարևոր կիրառությունները: Այս դժվարության շրջանցման ճանապարհներից մեկը պոտենցիալ փոստում գտնվող մասնիկի վարքը նկարագրող Շրյոդինգերի հավասարման մասին գաղափարի ներկայացումն է: Շատ կարևոր է, որ ցույց տրվի այդ հավասարման և պարզագույն մեխանիկական համակարգերի ներդաշնակ տատանումները բնութագրող հավասարման մաթեմատիկական նույնականությունը [5, էջեր 58-59]: Վերջինս հնարավորություն է տալիս մեխանիկական տատանումներ բաժնից աշակերտին ծանոթ լուծումներն ու արդյունքները «տեղափոխել» միկրոաշխարհի և ստանալ պոտենցիալ փոստում գտնվող մասնիկի վիճակը նկարագրող ալիքային ֆունկցիաներն ու էներգիական մակարդակները: Ավելին, ունենալով այդ ամենը հնարավորություն է ընձեռվում որակապես, իսկ երբեմն էլ քանակապես նկարագրել չափային քվանտացման երևույթները և գաղափար տալ նանոֆիզիկայի կարևոր հարցերի մասին:

Ֆիզիկական երևույթը հնարավորինս մատչելի կերպով մոդելավորելուց հետո փորձել դրան համապատասխան մոդելներ գտնել նաև բնության մեջ և առօրյայում

հանդիպող պարզ իրավիճակների համար: Նման «փոխարիրնող իրավիճակի» մոդելի տեսական և փորձնական վերլուծության արդյունքները և առհասարակ վերլուծության գործընթացը կօգնեն աշակերտներին առավել լավ պատկերացնել ֆիզիկայի արդի հիմնախնդիրների ավելի վերամբարձ մոդելներն ու դրանց շրջանակներում սպասվելիք ֆիզիկական արդյունքները: Ներկայացնենք մեկ օրինակ:

Ժամանակին կոսմոլոգիայում հայտնի է եղել ֆոտոմետրիկ մի պարադոքս՝ Օլբերսի պարադոքսը: Առաջին հայացքից ակնհայտ թվացող, սակայն ոչ լիարժեք խստություն ունեցող ֆիզիկական դատողությունների արդյունքում ստացվում էր, որ տիեզերքի ստացիոնար և համասեռ լինելու դեպքում Երկրի վրա ինչպես ցերեկային, այնպես էլ գիշերային երկինքը ամբողջովին պետք է լուսավորված լիներ գրեթե ցերեկային արևի պայծառությամբ [8]: Ժամանակի ընթացքում բազմաթիվ գիտնականների ջանքերի շնորհիվ Օլբերսի պարադոքսը ստացավ իր լիարժեք բացատրությունը: Հետաքրքիր է, որ պարադոքսի առաջին որակապես ճիշտ բացատրությունը տրվել է Էդգար Ալլան Պոի կողմից՝ «Էվրիկա» փիլիսոփայական պրենում: Օլբերսի պարադոքսի բացատրությունն ու դրա ճանապարհին առաջացած հարակից հարցերի քննարկումը շատ կարևոր է սովորողների մոտ կոսմոլոգիական արդի գաղափարների ձևավորման համար: Ստորև ներկայացվող խնդիրներից երկրորդը Օլբերսի պարադոքսին առնչվող խնդիր է: Առաջին խնդիրը թեև ուսումնասիրման օբյեկտով բոլորովին չի առնչվում երկրորդի հետ, սակայն իր մոդելավորման և լուծման մոտեցումներով դրան շատ մոտ մի խնդիր է: Լինելով առավել «առօրեական և երկրային», այն ինքնին պակաս հետաքրքրություն չի առաջացնում, սակայն ավելի հեշտ է լուծվում, ընդ որում դրա լուծման ձևն ու ստացված արդյունքը հուշող և կողմնորոշող կարող է լինել երկրորդ խնդրի լուծման համար: Բերենք նշված երկու խնդիրները [7, էջեր 30-31]:

1. Ենթադրենք Շերվուդյան անտառում ծառերի միջին շառավիղը $R=1$ մ է, իսկ դրանց քանակը անտառի միավոր մակերեսում՝ $\Sigma=0,005$ մ⁻²: Որոշել, թե միջինում l ի՞նչ հեռավորություն կարող է անցնել Ռոբին Հուդի պատահական ուղղությամբ արձակած նետը նախքան առաջին ծառին հարվածելը:

2. Ենթադրենք, գտնվում ենք անսահման մեծ, անսահման հին տիեզերքում, որի մեջ աստղերի միջին խտությունը $n=10^9$ Մպա⁻³ է և միջին աստղային շառավիղը հավասար է Արևի շառավիղին $R=R_{\odot}=7\cdot 10^8$ մ: Միջին հաշվով, որքա՞ն հեռու կարող ենք տեսնել որևէ կամայական ուղղությամբ, նախքան մեր տեսադաշտի աստղին հանդիպելը: (Ընդունեք, որ այս տիեզերքում գործում է ստանդարտ Էվկլիդեսյան երկրաչափությունը):

Մասնավոր պարզ իրավիճակների դիտարկում, օրինակ, երբ երևույթի ընթացքի համար էական մի քանի գործոններից մեկը, կամ մի քանիսը հաշվի չառնելով դիտարկում են պարզեցված մոդել կամ մոդելներ և ապա փորձում են աստիճանաբար բարդացնել մոդելը կամ «վերադրել» մի քանի մոդելների շրջանակներում ստացված արդյունքները: Հարկավոր է իհարկե սովորողների ուշադրությունը հրավիրել այն հանգամանքին, որ միշտ չէ, որ ընդհանուր մոդելում դիտվող երևույթը կարելի է ստանալ պարզ մոդելներում դիտվող առանձին երևույթների պարզագույն «գումարման» արդյունքում: Օրինակ, ավագ դպրոցի 11 - րդ դասարանի ֆիզիկայի դասընթացում սկզբում դիտարկվում է մագնիսական դաշտի ինդուկցիայի գծերի ուղղությամբ և այդ գծերին ուղղահայաց մտնող լիցքավորված մասնիկների շարժումները, ապա կամայական ուղղությամբ մտնող մասնիկի շարժումը՝ որպես դրանց վերադրում [3, էջեր 272-273]: Դպրոցական ծրագրի շրջանակում առաջադրվում են նաև խնդիրներ, երբ մասնիկը շարժվում է համատեղ գործող հաստատուն և համասեռ էլեկտրական և մագնիսական դաշտերում [1, էջ 196], որոնք ունեն նաև արդի կիրառական նշանակություն [6]: Նշված բոլոր օրինակներում էլեկտրական և մագնիսական դաշտերն համագիծ են, աշխատում են «անկախ» ձևով և գործում է շարժումների վերադրման սկզբունքը, ինչը թույլ է տալիս խնդրի լուծումը ներկայացնել մասնավոր խնդիրների լուծումների միավորման տեսքով: Սակայն հարկ է նշել, որ էլեկտրական և մագնիսական խաչվող դաշտերի կամայական ուղղորդվածության դեպքում այդ պարզագույն վերադրումը տեղի չունի և լիցքավորված մասնիկի դրեյֆային շարժումը քննարկելու համար պետք է ցուցաբերել լիովին այլ մոտեցումներ:

Մասնավոր իրավիճակի օրինակ է, երբ ֆիզիկական երևույթներն ու դրանց նկարագրման մաթեմատիկական ապարատը քննարկում են ցածր չափումներով տարածությունում և ապա ստացված արդյունքները փորձում ընդհանրացնել ավելի

բարձր չափումներով տարածության համար: Այս դեպքում նույնպես ցածր չափումներից բարձրի անցումը շատ բաներ էապես փոխում է, սակայն որոշակի գաղափարներ, որոնք դժվար է կամ անհնար պատկերացնել եռաչափ տարածության համար, կարելի է պատկերացնել երկչափի համար, ինչը հնարավորություն է տալիս սովորողին դրանք ավելի բնական ու իմաստավորված կերպով ընկալել եռաչափ տարածության համար: Բերենք մեկ օրինակ: Ակնհայտ է, որ եռաչափ տարածությունում R շառավղով սֆերիկ մակերևույթը երկչափ կոր տարածություն է, որի կորության շառավիղը R է: Բակալավրական կրթության ցածր կուրսերի և նույնիսկ ավագ դպրոցի խորացված ուսուցման շրջանակներում բևեռային կոորդինատների ներմուծմամբ բավականին պարզ դատողությունների արդյունքում կարելի է ստանալ նշված սֆերիկ մակերևույթի (r, θ) և $(r + dr, \theta + d\theta)$ կետերի միջև հեռավորության հետևյալ արտահայտությունը՝

$$dl^2 = dr^2 + R^2 \sin^2(r/R) d\theta^2 :$$

Եռաչափ տարածության պարագայում դժվար է պատկերացնել տարածության կոր լինելը, առավել ևս դրա կետերի միջև հեռավորության որոշման հարցը: Սակայն երկչափ տարածության համար, արդեն ստացած լինելով հեռավորության բանաձևը, այն հեշտությամբ կարելի է ընդհանրացնել եռաչափի համար (սֆերիկ կոորդինատային համակարգում)՝

$$dl^2 = dr^2 + R^2 \sin^2(r/R) [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2] :$$

Վերևում ներկայացվածն իհարկե չունի խիստ հիմնավորում և ապացույցի ուժ, սակայն քիչ գիտելիքների պարագայում օգնում է ձեռք բերել նոր գիտելիք, որն էլ իր հերթին կարող է կիրառվել արդի կոսմոլոգիական հարցերի քննարկման համար:

**ԿՈՍՄՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՊԱՐԶ ՄՈՂԵԼԻ ԵՎ ԳԱՂԱՓՈՐՆԵՐԻ ՀԱՆՐԱՍԱՏՉԵԼԻ
ԼՈՒՍԱԲԱՆՈՒՄԸ ԸՆՏՐՈՎԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ՕԳՆՈՒԹՅԱՄԲ**

Կոսմոլոգիան (տիեզերագիտություն) արդի գիտության ամենահետաքրքիր ուղղություններից մեկն է, որի զարգացման ընթացքում առաջ քաշված կարևոր գաղափարները ընդլայնել են մարդկային ճանաչողության և երևակայության սահմանները: Բնական է, որ ինչպես մեծերի, այնպես էլ փոքրերի մոտ առաջանում են հարցեր, թե ինչպիսի՞ն է տիեզերքը, ունի՞ արդյոք սահմաններ և տարիք և կամ թե ի՞նչ է կատարվում տիեզերքում ժամանակի ընթացքում և ի՞նչ է սպասվում ապագայում: Ցանկալի է, որ աշակերտներին հետաքրքրող տիեզերագիտական հարցերի որոշ հնարավոր քննարկումներ ներառվեն նաև ավագ դպրոցի ֆիզիկայի ուսուցման գործընթացում՝ չթողնել, որ այս կարևոր ու հետաքրքիր ոլորտի վերաբերյալ տեղեկույթը նրանք ստանան միայն կողմնակի աղբյուրներից: Սրա շնորհիվ աշակերտները ավելի կարժևորեն ֆիզիկայի դասընթացի շրջանակում իրենց ձեռք բերած գիտելիքները, ինչը կխթանի ուսուցման նկատմամբ նրանց մոտիվացիան: Կարծում ենք, որ կոսմոլոգիայի ֆիզիկական հիմունքների հանրամատչելի լուսաբանումը կարևոր է նաև այն տեսանկյունից, որ այն հանդիսանում է ՀՀ կառավարության որոշմամբ սահմանված գիտության գերակա ուղղություններից մեկը:

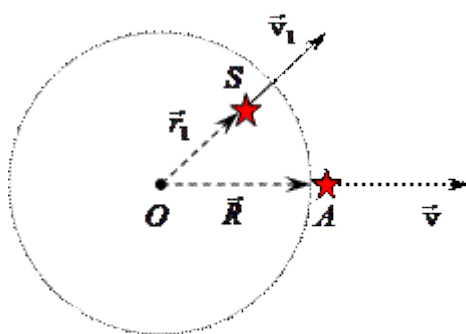
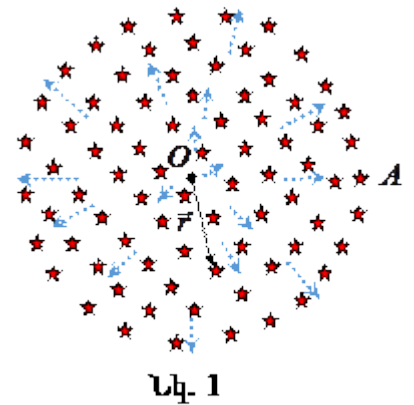
Սույն աշխատանքում առաջնորդվելով «կրթությունը որպես գիտության ուսումնական մոդել» հայեցակարգով, փորձելու ենք ի ցույց դնել արդի կոսմոլոգիական որոշ ընդհանուր հարցեր քննարկելիս ավագ դպրոցի ֆիզիկայի դասընթացում ձեռք բերված առարկայական գիտելիքների արդյունավետ կիրառությունների հնարավորությունը: Ասվածն իրականացնելու ենք նշված դասընթացի տարբեր մակարդակներում դիտարկվող ֆիզիկայի երեք խնդիրների համատեղ կիրառման օգնությամբ: Կարծում ենք ընտրովի խնդիրների լուծումների ընդհանրացման ճանապարհով արդի գիտական ձեռքբերումների մասսայականացումը կարող է հանդիսանալ տեսական հիմնարար գիտելիքի մատուցման և վերջինիս պրակտիկ կիրառությունների վեր հանման լավագույն զուգակցված միջոց, ինչում էլ կայանում է աշխատանքի գիտամանկավարժական նորույթը: Ըստ էության առաջարկվող մոտեցումը լուրջ խթան կարող է հանդիսանալ կրթության նկատմամբ ընդհանրապես, հետբուհական կրթության նկատմամբ

մասնավորապես, սովորողների մոտիվացիայի ապահովման համար և անշուշտ կունենա իմացաբանական նշանակություն նրանց աշխարհայացքի ձևավորման գործում:

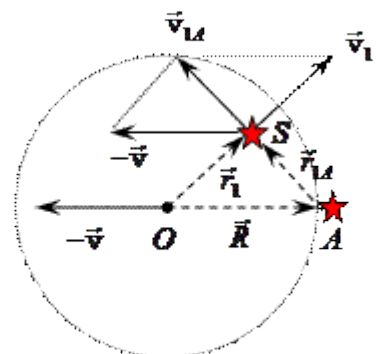
Ավագ դպրոցի ֆիզիկայի խորացված ուսուցման որոշ ընտրովի խնդիրներ: Քարերը նետելու ժամանակը

Ֆիզիկայի դպրոցական դասընթացի ինացության շրջանակներում դիտարկենք երեք խնդիր: Սկզբուն ներկայացնենք 2015 թ-ին ՇՊՀ -ում կազմակերպված ֆիզիկայի առարկայական օլիմպիադայի ժամանակ առաջադրված հետևյալ խնդիրը:

Խնդիր 1: Գնդաձև աստղակույտի O կենտրոնում գտնվող տիեզերագնացը նկատում է, որ աստղակույտի բոլոր աստղերը իրենից հեռանում են $\vec{v} = H\vec{r}$ օրինաչափությամբ, որտեղ H - ը հաստատուն մեծություն է, իսկ r - ը դիտվող աստղի հեռավորությունն է աստղակույտի կենտրոնից: Ինչպիսի՞ շարժում կկատարեն աստղերը աստղակույտի սահմանամերձ տիրույթի A աստղի մոտ գտնվող տիեզերագնացի նկատմամբ (նկ. 1):



Նկ. 2



Նկ. 3

Լուծում: Դիտարկենք աստղակույտի կամայական S աստղի շարժումը աստղակույտի O կենտրոնի և սահմանամերձ A աստղի նկատմամբ: Կենտրոնում գտնվող տիեզերագնացի նկատմամբ S -ը և A -ն ունեն

համապատասխանաբար $\vec{v}_1 = H\vec{r}_1$ և $\vec{v} = H\vec{R}$ արագություններ (նկ 2): A աստղի մոտ գտնվող տիեզերագնացի նկատմամբ O կենտրոնի $-\vec{v}$ և S աստղի \vec{v}_{1A} արագությունների վեկտորները պատկերված են նկ. 3-ում: Համաձայն արագությունների գումարման կանոնի S աստղի արագությունը A աստղի մոտ գտնվող տիեզերագնացի նկատմամբ կլինի

$$\vec{v}_{1A} = \vec{v}_1 - \vec{v} = H(\vec{r}_1 - \vec{R}) = H\vec{r}_{1A}$$

Ստացվածից պարզ է, որ A աստղի մոտ գտնվող տիեզերագնացի նկատմամբ բոլոր աստղերը հեռանում են նույն օրինաչափությամբ, ինչ որ դիտվում էր O կենտրոնի նկատմամբ: Քանի որ A աստղի ընտրությունը կամայական էր, ակնհայտ է դառնում, որ աստղակույտի ցանկացած աստղից մնացած բոլոր աստղերի հեռացման պատկերը կրկին լինում է նույն օրինաչափությամբ:

Դիտարկվող հաջորդ խնդիրը պատկանում է բարոն Մյունհաուզենի արկածների մոտիվներով ձևակերպված հայտնի խնդրաշարքին [4, էջ 23], որի առաջադրանքների պայմաններն ու պահանջները ներկայացված են բարոնի անունից:

Խնդիր 2: Մի անգամ իմ տիեզերական ճանապարհորդություններից մեկի ժամանակ ես հայտնվեցի մի զարմանալի մոլորակում, որը ներսից դատարկ էր և ուներ բարակապատ գնդոլորտի տեսք: Մոլորակի բնակիչները ապրում էին նրա ներսում և զարմանալիորեն մի վայրից մյուսը թռչում էին թեթև ցատքով՝ բոլորովին չզգալով ծանրության ուժի ազդեցությունը: Ինչպե՞ս կարելի է բացատրել այս երևույթը:

Լուծում: Փաստորեն անհրաժեշտ է ցույց տալ, որ բարակապատ գնդոլորտային խոռոչի կամայական կետում գտնվող m զանգվածով մարմնի վրա գնդոլորտի կողմից ազդող գրավիտացիոն ուժը հավասար է զրոյի [4, էջ 240 - 241], [3]:

Իրոք, քննարկենք գազաթի միևնույն փոքր անկյունն ունեցող երկու հակադիր կոնական մակերևույթներ, որոնց ընդհանուր A գազաթուն գտնվում է m զանգվածով նյութական կետը (նկ.4): Նշված մակերևույթները սֆերայից հատում

են S_1 և S_2 մակերեսներով փոքրիկ տարրական սեկտորներ: Պարզ երկրաչափական դատողությունների հիման վրա կարելի է ապացուցել, որ

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2},$$

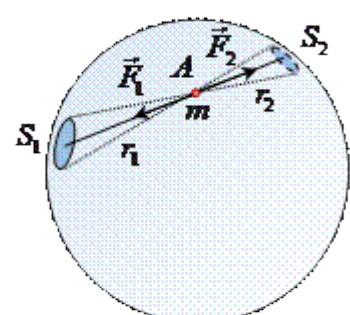
որտեղ r_1 և r_2 - ը տարրական սեկտորների հեռավորությունն է A կետից: Քանի որ գնդաձևը համասեռ է, հատույթի զանգվածն ուղիղ համեմատական է մակերեսից, հետևաբար՝

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2},$$

որտեղ m_1 և m_2 - ը գնդաձևի տարրական սեկտորների զանգվածներն են:

m_1 և m_2 զանգվածներով հատույթների կողմից m -ի վրա ազդող ուժերի մոդուլների հարաբերությունը կլինի $\frac{F_1}{F_2} = \frac{Gmm_1}{r_1^2} \cdot \frac{r_2^2}{Gmm_2} = 1$, այսինքն՝ $F_1 = F_2$: Սյուս

կողմից $\vec{F}_1 \uparrow \downarrow \vec{F}_2$, հետևաբար՝ $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$: Սֆերայի ամբողջ մակերևույթը կարելի է բաժանել բազմաթիվ զույգ սեկտորների, որոնց կողմից m - ի վրա ազդող զուևարային ուժը հավասար է զրոյի: Ուստի սֆերայի ներսում գտնվող մարմնի վրա ուժ չի ազդում և գրավիտացիոն դաշտի լարվածությունը խոռոչում ամենուրեք հավասար է զրոյի: Այս արդյունքը ճիշտ է նաև վերջավոր հաստություն ունեցող գնդաձևի համար, քանի որ վերջինս կարելի է բաժանել բազմաթիվ բարակ գնդային շերտերի: Նշենք, որ խոռոչի ներսում գրավիտացիոն դաշտի զրո լինելը հետևանք է այն բանի, որ գրավիտացիոն ուժը հակադարձ համեմատական է հեռավորության քառակուսուն՝ $F_g \propto 1/r^2$:



Նկ. 4

Համառոտ քննարկեն ֆիզիկայի դասընթացի խորացված ուսուցման շրջանակում դիտարկվող ևս մեկ խնդիր [2, էջ 182], որն իր վերլուծությամբ կարող է կիրառվել պարզագույն կոսմոլոգիական մոդելների քննարկման ժամանակ:

Խնդիր 3: Ի՞նչ նվազագույն արագություն պետք է հաղորդել մարմնին, որպեսզի այն հեռանա և այլևս չվերադառնա Երկիր: Մթնոլորտի դիմադրության ուժն անտեսել:

Լուծում: Պահանջվող արագությունը, որին անվանում են երկրորդ տիեզերական արագություն, որոշվում է էներգիայի պահպանման օրենքից, հաշվի առնելով, որ Երկրից շատ մեծ հեռավորությունների դեպքում, երբ մարմնի արագությունը ձգտում է զրոյի, գրավիտացիոն փոխազդեցությունը բացակայում է և համապատասխան պոտենցիալ էներգիան զրոյական է: Այսպիսով, Երկրից անվերադարձ հեռացման համար անվերջությունում մարմնի լրիվ մեխանիկական էներգիան պետք է լինի զրո, ուրեմն այն զրո պետք է լինի նաև շարժման սկզբում՝

$$\frac{mv_0^2}{2} - G \frac{mM}{R} = 0,$$

որտեղ m - ը մարմնի զանգվածն է, R - ը Երկրի շառավիղն է, M - ը՝ զանգվածը: Այսպիսով, որոնելի արագության համար ստանում ենք՝ $v_0 = \sqrt{2GM/R}$: Պարզ է, որ նշված արագությունից փոքր արագություն հաղորդելու դեպքում մարմինը կհասնի որոշակի առավելագույն հեռավորության, մի պահ կանգ կառնի և ապա գրավիտացիոն ուժի ազդեցության ներքո կշարժվի դեպի Երկիր: Ակնհայտ է նաև, որ v_0 -ից մեծ արագության դեպքում մարմինը կլքի Երկիրը՝ անվերջ հեռվում ունենալով որոշակի «մնացորդային» արագություն:

Տիեզերքի կոսմոլոգիական պարզագույն նյութոնյան մոդելը: Քարերը հավաքելու ժամանակը

Դիտարկված խնդիրները հնարավորություն են տալիս ֆիզիկայի դպրոցական դասընթացի շրջանակում քննարկել կոսմոլոգիական որոշ կարևոր գաղափարներ և պարզագույն կոսմոլոգիական մոդելներ: Կոսմոլոգիան աստղագիտության այն ճյուղն է, որն ուսումնասիրում է տիեզերքի, որպես ամբողջության, էվոլյուցիան և ֆիզիկական հատկությունները: Հարկ է նշել, որ կոսմոլոգիական, որպես լուրջ գիտական ուսմունք, ձևավորվել և զարգացել է նախորդ դարի տասնհինգ - քսանական թվականներից, պայմանավորված հարաբերականության ընդհանուր տեսության (ՀՇՏ)

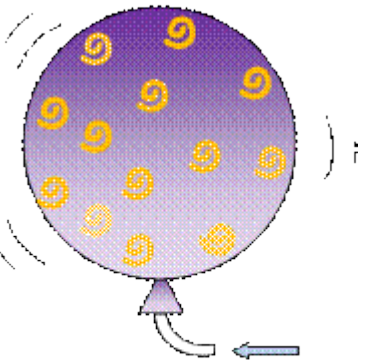
ստեղծումով: Ֆիզիկական տեսակետից բավականաչափ կոռեկտ կոսմոլոգիական տեսությունները հենված են վերջինիս վրա և պատահական չէ, որ դրանցից առաջին պարզագույնը, այն է տիեզերքի ստացիոնար մոդելը առաջադրվել է Ա. Այնշտայնի կողմից: Հետագայում սակայն պարզվեց, որ տիեզերական մեծամասշտաբ որոշ պրոցեսների համար անհամեմատ ավելի պարզ բացատրություններ, թեկուզ ոչ լիարժեք ճշտությամբ, կարող է տալ նաև նյուտոնյան մեխանիկան: Այս հնարավորությունը իր արդյունավետ և օգտակար կիրառությունը կարող է գտնել ինչպես ուսուցման գործընթացում, այնպես էլ գիտական արդի գաղափարների մասսայականացման հարցում: Իսկապես, հնարավորություն է ստեղծվում տարբեր տարիքային խմբերի հետաքրքրասեր անձանց ընդհանուր գծերով ներկայացնել տիեզերագիտության արդի նվաճումները՝ դուրս չգալով ֆիզիկայից ունեցած իրենց տարրական գիտելիքների շրջանակներից: Հաշվի առնելով ֆիզիկայի «պարուրածն սխեմայով» ուսուցման արդյունավետությունը, հնարավորություն է առաջանում նախ կոսմոլոգիական կարևոր գաղափարները աշակերտին ներկայացնել իր իմացած նյուտոնյան մեխանիկայի շրջանակում, և ապա ուսումնառության հետագա մակարդակներում (ԲՈՒՀ, հետբուհական կրթություն) նոր արդեն ավելի խորն ու ճշգրիտ կերպով՝ ՀՋՏ շրջանակում: Ստորև, ֆիզիկայի դպրոցական դասընթացի մեր կողմից դիտարկված ընտրովի խնդիրներում արծարծված գաղափարների և արդյունքների օգնությամբ նյուտոնյան մեխանիկայի շրջանակում քննարկելու ենք կոսմոլոգիական որոշ գաղափարներ և մեկ պարզագույն կոսմոլոգիական մոդել:

Սկսենք նրանից, որ հիմք ընդունելով դիտողական տվյալները, ժամանակակից կոսմոլոգիայում տիեզերքը համարվում է համասեռ և իզոտրոպ: Սա հնարավորություն է տալիս խոսել տիեզերքի խտության մասին, ժամանակի ցանկացած պահին համարելով այն նույնը տիեզերքի բոլոր մասերի համար: Մյուս կարևոր դիտողական փաստը վերաբերվում է տիեզերքի ընդարձակմանը: Դիտումները ցույց են տալիս, որ մեծամասշտաբ տիեզերքի բոլոր օբյեկտները (գալակտիկաներ) մեզանից հեռանում են Հաբլի օրենքի համաձայն, այսինքն՝

$$\vec{v} = H\vec{r}$$

օրիաչափությամբ, որտեղ r - ը տվյալ գալակտիկայի հեռավորությունն է մեզանից, իսկ H - ը Հաբլի հաստատունն է: Նշենք, որ ֆիզիկայի և աստղագիտության

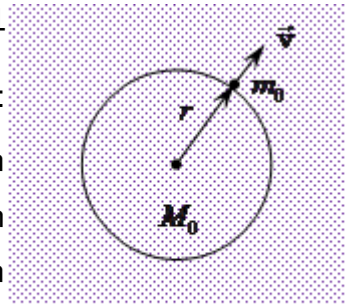
դասագրքում տրված է գաղափար այդ օրենքի և որոշ այլ տիեզերագիտական գաղափարների մասին [1, էջ 183-185]: Տիեզերական մարմինների Չաբլի օրենքով մեզանից հեռանալու իրողությունը երբեմն ստեղծում է այն թյուր տպավորությունը, թե տիեզերքում մենք գրավում ենք հատուկ կենտրոնական դիրք և մնացած ամեն ինչ մեզանից հեռանում է: Դրանից խուսափելու համար ի սկզբանե աշակերտներին կարելի է առաջադրել *խնդիր 1*-ը, որի լուծման արդյունքից ակնհայտորեն բխում է, որ Չաբլի օրենքով գալակտիկաների հեռացում է գրանցում նաև տիեզերքի ցանկացած տեղում գտնվող դիտորդը և մենք բոլորովին էլ տիեզերքի կենտրոնում չենք, դեռ ավելին չկա նման գաղափար: Կարծում ենք, որ լավ կլինի այս հարցերի քննարկման ընթացքում սովորողներին ներկայացնել ՋԸՏ տեսանկյունից տիեզերքի ընդարձակման հայեցակետը, համաձայն որի ոչ թե գալակտիկաներն են տիեզերքում շարժվելով հեռանում միմիանցից, այլ դրանց «կրող» տիեզերքն է ընդարձակվում: Դա կարելի է անել փուչիկի հայտնի օրինակով, որի վրա պատկերված են գալակտիկաներ: Փուչիկի լցվելու ընթացքում նրա վրա գտնվող պատկերները չեն շարժվում փուչիկի նկատմամբ, սակայն նրանց հեռավորությունը մեծանում է փուչիկի ընդարձակման հետևանքով (փուչիկի մակերևույթի երկչափ սֆերիկ տարածության ընդարձակում): Փուչիկի մակերևույթի երկրափ տարածությունը ակնհայտորեն չունի կենտրոն և նրանում բոլոր «գալակտիկաները» հեռանում են տարածության ընդարձակման հետևանքով (նկ. 5): Այս ամենին ծանոթանալուց հետո աշակերտներին արդեն պարզ կլինի ժամանակակից կոսմոլոգիայի հիմնական սկզբունքը, համաձայն որի՝ *ժամանակի միևնույն պահին յուրաքանչյուր դիտորդ անկախ վայրից ու դիտման ուղղությունից մեծամասշտաբ տիեզերքում տեսնում է միևնույն միջին պատկերը*:



Նկ. 5

Այժմ քննարկենք Չաբլի օրենքով ընդարձակվող համասեռ և իզոտրոպ տիեզերքի պարզ մոդելը, երբ միմիանցից հեռացող տիեզերական օբյեկտները փոխազդում են միայն գրավիտացիոն ուժերով: Դիտարկենք որևէ «փորձնական մասնիկ» (գալակտիկայի) շարժումը մեր նկատմամբ: Դիցուք ժամանակի տվյալ պահին այդ գալակտիկան մեզանից ունի r հեռավորություն: Դիտարկենք տիեզերքի այն գնդաձև մասը, որի կենտրոնում մենք ենք, իսկ փորձնական մասնիկ հանդիսացող գալակտիկան՝ դրա մակերևույթին (նկ. 6): Տիեզերքի դիտարկված

գնդաձև մասի հետ գրավիտացիոն փոխազդեցության հետևանքով m_0 զանգվածով փորձնական գալակտիկան կունենա $-G \frac{m_0 M_0}{r}$ պոտենցիալ էներգիա, որտեղ M_0 -ն տիեզերքի այդ մասի զանգվածն է: Գնդից դուրս գտնվող տիեզերքի մնացած ամբողջ մասը կարելի է դիտարկել որպես համակենտրոն գնդային թաղանթների համակարգ [5, էջ 15], որոնց ներսում գտնվող գալակտիկայի վրա, ինչպես հետևում է *խնդիր 2*-ից, գրավիտացիոն ազդեցությունը բացակայում է: Սա հնարավորություն է տալիս որպես գալակտիկայի պոտենցիալ էներգիա ընդունել վերոգրյալ արտահայտությունը և նրա լրիվ մեխանիկական էներգիան գրել հետևյալ տեսքով



Նկ. 6

$$\frac{m_0 v^2}{2} - G \frac{m_0 M_0}{r} = 0,$$

որտեղ v - ն գալակտիկայի արագությունն է: Նկատենք, որ չնայած ժամանակի ընթացքում տիեզերքի մեր կողմից դիտարկված գնդաձև մասը ընդարձակվում է, սակայն նրանում պարփակված նյութի զանգվածը չի փոխվում և համաձայն վերը նկարագրվածի գնդից դուրս գտնվող նյութն էլ ոչ մի կերպ չի ազդում նրա ընդարձակման վրա: Այս ամենը հնարավորություն է տալիս օգտվել *խնդիր 3*-ի արդյունքից և պնդել, որ $v \geq \sqrt{2GM_0/r}$ դեպքում տիեզերքը անվերջ կընդարձակվի, իսկ երբ տեղի ունի $v < \sqrt{2GM_0/r}$ պայմանը, ապա որոշ ժամանակից տիեզերքի ընդարձակումը կդադարի և ապա կսկսվի գրավիտացիոն կոլապսի պրոցես: Փաստորեն այս մոդելի շրջանակում տիեզերքի հետագա դինամիկան կախված է այն բանից, թե v արագությունը փոքր է, մեծ թե հավասար է $\sqrt{2GM_0/r}$ կրիտիկական արժեքին, որի դեպքում M_0 -ն արտահայտելով խտության և ծավալի արտադրյալի տեսքով և v -ն էլ՝ Ջաբլի օրենքով, արդյունքում ստանում ենք կրիտիկական խտության հետևյալ արտահայտությունը

$$\rho_0 = \frac{3H^2}{8\pi G}:$$

Չետաքրքիր է, որ կրիտիկական խտության համար ստացված արտահայտությունը լիովին համընկնում է ՋԸՏ հիման վրա Ա. Ֆրիդմանի կողմից առաջարկված հայտնի կոսմոլոգիական մոդելի շրջանակում ստացված համապատասխան արտահայտությանը: Երբ արդեն բերված է կրիտիկական խտության գաղափարը կարելի է աշակերտներին առաջարկել քննարկելու տիեզերքի էվոլյուցիայի հնարավոր սցենարները՝ կախված դիտողական տվյալներից ստացված խտության ρ միջին արժեքի և ρ_0 կրիտիկական արժեքի հարաբերակցությունից և գալ այն մտքին, որ $\rho \leq \rho_0$ դեպքում ընդարձակումը անվերջորեն շարունակվելու է, իսկ երբ $\rho < \rho_0$ ՝ ինչ որ պահի տիեզերքի ընդարձակվելը դադարելու է և սկսվելու է սեղմման պրոցեսը:

Եզրակացություն

Կարծում ենք վերը նկարագրված մոտեցման իրականացումը կոսմոլոգիայի հետ աշակերտների ծանոթացումը կդարձնի հնարավորինս բովանդակալից և կոնկրետ՝ հնարավորություն տալով կիրառելու ֆիզիկայից ունեցած իրենց առարկայական գիտելիքները: Չուտ հետաքրքիր ինֆորմացիա հավաքելուց բացի նրանք կկարողանան որոշ գաղափարների հանգել նաև ինքնուրույն վերլուծության միջոցով: Այնուհանդերձ անհրաժեշտ է նրանց բացատրել, որ շատ ու շատ գաղափարներ և երևույթներ կան, որոնք չեն կարող բացատրվել նման պարզագույն մոդելի շրջանակում և նույնիսկ արդի կոսմոլոգիական մոդելները չեն տալիս բազմաթիվ հարցերի պատասխաններ: Մեր քննարկած մոդելում տիեզերքի էվոլյուցիայի հետագա ընթացքը պայմանավորված էր ընդամենը նախնական պայմաններով և գրավիտացիոն ուժերով: ՀԸՏ հիմքով կառուցված արդի տեսական մոդելներում փոխվում է տիեզերքի դինամիկայի նկարագրման ֆիզիկական հիմունքները և ավելանում են բազմաթիվ այլ «դերակատարներ»՝ տարբեր դաշտեր, համատիեզերական մակարդակով վանողություն բնութագրող ^A անդամ, մութ մատերիա, մութ էներգիա և այլն: Միկրոաշխարհը (ատոմական աշխարհ), որի բնութագրական չափերը կարգով մոտ ^{10¹⁰} անգամ փոքր են մակրոաշխարհի բնութագրական չափերից, այլևս չեն ենթարկվում դասական ֆիզիկայի օրենքներին և նկարագրվում են քվանտային մեխանիկայի օրինաչափություններով: Կոսմոլոգիայի ուսումնասիրության օբյեկտ հանդիսացող դիտելի տիեզերքի չափերը արդեն ^{10²³} (կարգով շատ ավելի մեծ) անգամ է գերազանցում մակրոմարմինների բնութագրական չափերից, և սպասելի է, որ այստեղ նույնպես կգործեն բոլորովին այլ ֆիզիկական օրենքներ:

Կարծում ենք, որ դպրոցական ֆիզիկայի իմացության շրջանակում գիտության արդի գաղափարների թեկուզ ոչ մեծ խորությամբ ու ընդհանրությամբ ներկայացումն ու քննարկումը, լրացնելով պարտադիր կրթամասին, աշակերտների համար գիտելիքների կիրառման հավելյալ հնարավորություն է ստեղծում և հանդիսանալով հետաքրքրությունների զարգացման օժանդակ միջոց, կարող է սեր և մոտիվացիա առաջացնել ֆիզիկայի նկատմամբ, ինչը ֆիզիկայի արդի ուսուցման համար ունի կարևոր նշանակություն:

Ամփոփելով կարող ենք փաստել, որ ֆիզիկայի արդի նվաճումների հանրամատչելի մատուցման աշխատանքում ներկայացված մեթոդոլոգիական ուղիներն արդարացված, հաջողված և արդյունավետ «գործիք» կարող են հանդիսանալ սովորողներին դպրոցական և բուհական իմացության շրջանակում ժամանակակից ֆիզիկական ձեռքբերումների հնարավորինս կոռեկտ ներկայացման համար: Ինչպես համոզվեցինք, այդ ամենը լավագույնս կարելի է իրականացնել «ճիշտ» ընտրված, աստիճանական բարդացման սկզբունքով կազմված բազմամակարդակ խնդիրների միջոցով, ինչը կարծում ենք կնպաստի սովորողների կարողությունների և հմտությունների խթանմանը, զարգացնելով նրանց որոնողական ընդունակություններն ու ստեղծագործական մտածողությունը:

Գրականություն

1. Ալավերդյան Ռ., Մելիքյան Գ., Նինոյան Ժ., Պետրոսյան Ա., Ֆիզիկայի խնդիրների ժողովածու: Եր.: Ջեդ հրատ., 2009. – 272 էջ:
2. Ղազարյան Է., Կիրակոսյան Ա., Մելիքյան Գ., Մամյան Ա., Մայիլյան Ս., Ֆիզիկա-10: Ավագ դպրոցի 10-րդ դաս. դասագիրք ընդհանուր և բնագիտամաթեմատիկական հոսքերի համար: Եր.: «Էդիթ Պրինտ», 2010. - 272 էջ:
3. Ղազարյան Է., Կիրակոսյան Ա., Մելիքյան Գ., Մամյան Ա., Մայիլյան Ս., Ֆիզիկա-11: Ավագ դպրոցի 11-րդ դաս. դասագիրք ընդհանուր և բնագիտամաթեմատիկական հոսքերի համար: Եր.: «Էդիթ Պրինտ», 2010.- 368 էջ:
4. Ղազարյան Է., Կիրակոսյան Ա., Մելիքյան Գ., Մամյան Ա., Մայիլյան Ս., Ֆիզիկա-12: Ավագ դպրոցի 12-րդ դաս. դասագիրք ընդհանուր և բնագիտամաթեմատիկական հոսքերի համար: Եր.: «Էդիթ Պրինտ», 2011.- 264 էջ:
5. Ղազարյան Է., Սարգսյան Յ., Յայրապետյան Ռ., Ջարմանալի նանոաշխարհ.- Եր.: «Աստղիկ գրատուն», 2013.-128 էջ:
6. Սերոբյան Ե., Մանուկյան Վ., Լիցքավորված մասնիկի շարժումը զուգորդված էլեկտրական և մագնիսական դաշտերում, «Բնագետ», 2006, 1-2, էջ. 43-47
7. Ղազարյան Է., Կիրակոսյան Ա., Մելիքյան Գ., Թոսունյան Ռ., Մայիլյան Ս., Ներսիսյան Ս., «Ֆիզիկա և աստղագիտություն - 9», Եր.: «Էդիթ Պրինտ», 2015 – 224 էջ:
8. Մելիքյան Գ., «Ֆիզիկայի խնդիրների լուծման մեթոդական ձեռնարկ», Եր.: «Էդիթ Պրինտ», 2006:
9. Гельфгат И.М., Генденштейн Л.Э., Кирик Л.А., "1001 задач по физике", Харьков – Москва, 1996, - 597 с.
10. Новиков И.Д., Как взорвалась Вселенная. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1988.- 176 с. – (Б - чка «Квант». Вып. 68.)
11. Ryden B., Introduction to cosmology, Cambridge University Press, 2006. – 301 p.
12. https://en.wikipedia.org/wiki/Olbers%27_paradox